

Computergestuurde Circulatieregelingen

Optimaal bewaarklimaat met minimaal energieverbruik

J. Wildschut (WUR/PPO Bloembollen)

H.H.J. Janssen, Th.G. Gielen, A. Sapounas (WUR Glastuinbouw)

© 2011 Wageningen, Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO) onderzoeksinstituut Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

DLO is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Dit project is uitgevoerd in opdracht van en gefinancierd door de partijen in de Meerjarenaafpraak energie Bloembollen (KAVB, PT, min.EL&I, Agentschap NL en telers).



Projectnummer: 32 361158 10

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, onderdeel van Wageningen UR

Bloembollen, Boomkwekerij & Fruit

Adres: Prof. Van Slogterenweg 2
Postbus 85, 2160 AB Lisse

Tel.: 0252 - 462121

Fax: 0252 - 462100

E-mail: info.ppo@wur.nl

Internet: www.ppo.wur.nl

Inhoudsopgave

pagina

SAMENVATTING.....	5
1 INLEIDING	7
2 WERKWIJZE.....	7
3 RESULTATEN	9
3.1 Scenario's.....	9
3.2 Sensoren	19
3.2.1 Luchtsnelheid	20
3.2.2 Kistentelling.....	25
3.3 Regelsystemen.....	26
4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	28
BIJLAGE 1: ALTERNATIEVE NANOTECHNOLOGIE VOOR ETHYLEENMETING?	31
BIJLAGE 2: DRAADLOZE SYSTEMEN.....	37

Samenvatting

Bij het bewaren van bloembollen in kuubskisten gestapeld voor een systeemwand in een bewaarcel wordt voor de ventilatie met buitenlucht, en voor de circulatie met cellucht veel energie verbruikt. Door het ventilatiedebiet met de klimaatcomputer te sturen op basis van ethyleenmeting wordt bij het bewaren van tulpenbollen veel energie (gas) bespaard. Het energieverbruik bij de circulatie is uitsluitend voor de stroomvoorziening van de ventilatoren. Het circulatiedebiet wordt niet door de klimaatcomputer gestuurd, maar wordt handmatig via een frequentieregelaar ingesteld. Door ook de circulatie via de frequentieregelaar met de klimaatcomputer te sturen kan door het 3^{de}-machtsverband tussen toerental en energieverbruik veel energie bespaard worden. In tegenstelling tot ethyleengestuurde ventilatie is computergestuurde circulatie niet alleen toepasbaar bij tulp, maar bij alle bolgewassen. Op sectorniveau kan hiermee dus heel veel energie bespaard worden.

Doelstelling van dit project is het ontwikkelen van op sensoren gebaseerde computergestuurde regelingen voor de circulatie, waardoor bij een optimaal bewaarklimaat voor alle bolgewassen zeer fors op het elektraverbruik voor circulatie bespaard kan worden.

Hiertoe zijn ventilatie, circulatie en bewaarklimaat bij verschillende bewaarscenario's modelmatig doorgerekend om impact op energieverbruik per kist en op sectorniveau te bepalen. Daarnaast is geïnterviewd welk type sensor voor computergestuurde circulatie geschikt is. Hierbij is gekeken naar sensoren die direct of indirect het debiet van systeemventilatoren kunnen meten (luchtsnelheid- en druksensoren) en sensoren waarmee direct of indirect het aantal kuubskisten voor de systeemwand bepaald kan worden.

De modelmatig doorberekende scenario's voor sensor- / computergestuurde circulatie laten zien dat ook de circulatie aan de behoefte aangepast kan worden. Hierbij zijn 3 relevante scenario's onderscheiden:

Het breedst toepasbaar is het scenario waarmee met afstandsensoren het aantal kisten voor een circulatieventilator bepaald wordt en met luchtsnelheidssensoren tegelijkertijd het debiet van die ventilator. Wanneer door een grotere bolmaat, minder gevulde kisten of door het weghalen van kisten het gemiddelde debiet per kist toeneemt kan het regelsysteem de ventilator automatisch terugtoeren zodat het debiet weer op een vooraf ingesteld niveau uit komt. Bij het bv. voor verwerking tijdelijk weghalen van 2 – 3 kolommen kisten wordt zo al ruim 50% op elektra bespaard. Met ditzelfde systeem kan ook de ventilatie van de bewaarcel aan het aantal kisten aangepast worden, zodat ook het ventilatiedebiet per kist constant blijft. Op gas wordt dan ook nog eens 20 – 30 % bespaard.

Een 2^{de} scenario is alleen van toepassing bij de ethyleengestuurde bewaring van tulpenbollen. Hiervoor is alleen aangepaste software voor de klimaatcomputer nodig. De energiebesparingen met dit scenario zijn afhankelijk van ΔT en van de ethyleenproductie door zure bollen. Bij een gemiddelde $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ kan bij voldoende ventilatiecapaciteit bij 5% zure bollen al 23% op energie bespaard worden door iets meer te ventileren waardoor er fors minder gecirculeerd hoeft te worden. Bij gemiddeld 1% zure bollen in de cel wordt dan op gas + elektra 63% bespaard terwijl het bewaarklimaat ook in een kist met 5% zure bollen optimaal is. Dit scenario is echter alleen geschikt voor volle bewaarcellen en niet voor het aanpassen van de circulatie aan het weghalen van kisten en aan een andere kistinhoud.

Een 3^{de} scenario, ook alleen voor tulp geschikt, combineert de eerste 2 en realiseert wel het aanpassen van de circulatie aan het weghalen van kisten en aan een andere kistinhoud. De energiebesparingen zijn dan nog veel groter dan bij het 2^{de} scenario.

Voor het 1^{ste} en 3^{de} scenario zijn de luchtsnelheidssensoren gebaseerd op thermische geleiding en mogelijk ook de Pitotbuis geschikt. Het eenvoudigste kistentelsysteem is op basis van een afstandsensor. De koppeling aan een digitaal administratief magazijnsysteem is hier een zeer interessant alternatief voor. De verwachte investeringen voor computergestuurde circulatie zijn relatief laag en de mogelijke energiebesparingen zijn hoog. De terugverdientijden zijn naar verwachting kort (binnen enkele jaren).

1 Inleiding

Bloembollen worden bewaard in kuubskisten (kisten met daaronder een palletruimte) die in een bewaarcel voor een systeemwand staan gestapeld. De lucht in de bewaarcel wordt continue ververs met buitenlucht, waarbij het debiet varieert van minder dan 20 m³/uur tot ruim 150 m³/uur per m³ bollen: de **ventilatie**. De temperatuur in de bewaarcel wordt volgens een preparatieschema constant gehouden. Kuubskisten variëren in grootte van 800 tot 1200 liter en worden 4 tot 6 hoog gestapeld, 5 tot 10 kisten diep en in 4 tot 6 rijen. Met zware ventilatoren (2 – 3 kW) wordt via het palletkanaal door de geperforeerde kistbodem cellucht door de bollen geblazen met een debiet van gemiddeld 500 m³/uur per m³ bollen: de **circulatie**. Per ventilator worden 1 of 2 rijen kisten aangeblazen en ook per uitblaasopening van de systeemwand worden 1 of 2 lagen kisten aangeblazen (de zg. 1-laags en 2-laagssystemen).

Ventilatie heeft als functie om ethyleen (bij tulpenbollen), of CO₂, water(damp) en soms ook warmte af te voeren en eventueel O₂ aan te voeren, zodat bewaarcondities optimaal zijn en hiermee de kwaliteit van de bollen hoog. Circulatie heeft in principe dezelfde functie: optimale bewaarcondities in termen van ethyleengehalte, RV, temperatuur, CO₂ en O₂. Daarnaast is voldoende circulatie van belang om eventuele verschillen in bewaarcondities tussen kisten te minimaliseren.

De ventilatiecapaciteit en de circulatiecapaciteit van de ventilatoren is hierop geïnstalleerd. Voor tulpenbollen is de geïnstalleerde ventilatiecapaciteit meestal 100 tot 150 m³/uur per m³ bollen. Dit is ruim voldoende om de ethyleenproductie door 5% zure bollen af te voeren en daarmee het ethyleengehalte in de bewaarcel onder de schadedrempel van 100 ppb te houden. Andere gewassen kunnen in principe met minder toe.

Voor de ventilatie van een bewaarcel met tulpenbollen kan via de klimaatcomputer het debiet in de eerste plaats gestuurd worden door de ethyleensensor, daarna zoals bij andere bolgewassen door RV-, temperatuur- en soms ook CO₂-sensoren. Bij een lage ethyleenproductie als gevolg van weinig zure bollen wordt dan minder geventileerd en evenredig hieraan minder energie verbruikt voor het op temperatuur houden van de bewaarcel. Hiermee wordt uitdroging door excessieve ventilatie voorkomen, het bewaarklimaat geoptimaliseerd en wordt in de praktijk gemiddeld ongeveer 50% op energie (gas) bespaard.

De circulatie wordt tot op heden niet via de klimaatcomputer gestuurd. Het toerental van de circulatie-ventilator kan wel handmatig geregeld worden via frequentieregelaars. Het energieverbruik vermindert daarmee met de derde macht van het toerental: terugtoeren met slechts 10% geeft al een energiebesparing van 25%. Het voorkómen van overmatig circuleren kan dus zeer veel energie besparen.

Doelstelling van dit project is het ontwikkelen van op sensoren gebaseerde computergestuurde regelingen voor de circulatie, waardoor bij een optimaal bewaarklimaat voor alle bolgewassen zeer fors op het elektraverbruik voor circulatie bespaard kan worden.

2 Werkwijze

Als eerste stap is geïnventariseerd welk type sensor voor computergestuurde circulatie geschikt is. Hierbij is gekeken naar sensoren die direct of indirect het debiet van systeemventilatoren kunnen meten (luchtsnelheid- en druksensoren) en sensoren waarmee direct of indirect het aantal kuubskisten voor de systeemwand bepaald kan worden. Voor zover mogelijk zijn hierbij prijsindicaties gegeven.

Daarnaast zijn ventilatie, circulatie en bewaarklimaat bij verschillende bewaarscenario's modelmatig doorgerekend om impact op energieverbruik per kist en op sectorniveau te bepalen. Uitgangssituatie was hierbij een bewaarcel met 5 rijen x 6 kisten van 1200 liter hoog x 10 diep, voor elke rij met een 3kW ventilator. Het gemiddelde circulatiedebiet is dan 500 m³/uur per m³ bollen bij 50 Hz. De ventilatie bij 100% klepstand is 125 m³/uur. Bij gemiddeld 5% zure bollen in de kisten in de cel is dit voldoende voor een optimaal bewaarklimaat. Het ethyleengehalte van de cellucht blijft dan onder de 100 ppb, in een kist met 5 % zure bollen blijft het gemiddelde ethyleengehalte onder de 118 ppb.

Vervolgens zijn de concepten van regelsystemen voor de meest gunstige combinaties van bewaarscenario's en sensorentechnologie geschetst, de belangrijkste conclusies getrokken en worden aanbevelingen gegeven voor een 2^{de} fase van dit project.

3 Resultaten

3.1 Scenario's

Uit de resultaten van de Energiemonitor van de bloembollensector 2009 blijkt dat ruim 50% van de bloembollenbedrijven een klimaatcomputer in gebruik heeft. Bijna 40% van de bedrijven heeft frequentieregelaars op de circulatieventilatoren. Om direct een regeling op debiet te kunnen installeren zijn een klimaatcomputer *plus* frequentieregelaars nodig. Dit is op 28% van de bedrijven het geval. Slechts 8 % van de bedrijven heeft één of meerdere ethyleenanalysers geïnstalleerd, tabel 1.

Tabel 1: Deel van de bedrijven dat klimaatcomputers, frequentieregelaars en ethyleenanalysers toepast (E-monitor, n=531).

jaar	Klimaat computer	Frequentie-geregelde circulatie	Ethyleen analyser	Klimaat computer <i>plus</i>		
				Frequentie regelaar	Ethyleen analyser	Frq + Ethyleen
2007	36%	23%	4,6%	14%	3,0%	1,6%
2008	48%	36%	7,1%	25%	6,3%	5,3%
2009	53%	39%	8,1%	28%	7,3%	6,0%

Gerekend naar areaal zijn deze percentages hoger: Bedrijven met klimaatcomputers telen 64% van het areaal, met frequentieregelaars 51% en met klimaatcomputers *plus* frequentieregelaars 43%, tabel 2. De tabellen geven ook aan dat er een duidelijke toenemende trend is in de toepassing van klimaatcomputers, frequentieregelaars en ethyleenanalysers.

Tabel 2: Deel van het areaal waar klimaatcomputers, frequentieregelaars en ethyleenanalysers toepast worden (E-monitor, n=531).

jaar	Klimaat computer	Frequentie-geregelde circulatie	Ethyleen analyser	Klimaat computer <i>plus</i>		
				Frequentie regelaar	Ethyleen analyser	Frq + Ethyleen
2007	42%	26%	7,6%	18%	4,5%	2,0%
2008	57%	41%	12,9%	33%	11,9%	10,0%
2009	64%	51%	15,3%	43%	14,5%	13,1%

Het meest voorkomende scenario is circuleren zonder dat via de klimaatcomputer de frequentieregelaars ingesteld kunnen worden. Hierbij bepaalt het geïnstalleerde vermogen van de ventilatoren het maximale debiet. Gemiddeld over de kisten die per ventilator voor de systeemwand gestapeld staan is dit meestal ≥ 500 m³/uur per m³ bollen en is afhankelijk van de weerstand die de luchtstroom ondervindt. Het gemiddelde debiet per kist wordt daarom bepaald door:

- o De bolmaat van de bollen in de kist
- o Hoe vol de kist is
- o Het aantal kisten voor de wand (meer kisten → minder weerstand, maar per kist meer debiet)
- o Het type wand (één-laags of tweelaags, met of zonder aanpassingen zoals een schans of afgeronde uitblaasopeningen)
- o Het vermogen van de ventilator

Daarnaast speelt de verdeling van de luchtstroom over de lagen en binnen de lagen een belangrijke rol: Het verschil tussen het debiet van de minst beluchte kist en het gemiddelde debiet kan groot zijn (tot een factor 2 à 3), zodat vaak extra gecirculeerd wordt om ook de minst beluchte kist voldoende lucht te geven.

De circulatienorm van 500 m³/uur per m³ bollen wordt in het algemeen geadviseerd voor alle bolgewassen, met uitzondering van de koel en vochtig te bewaren bollen van bv. lelies. De norm wordt later in het bewaarseizoen, voor tulp bv. na begin september, bijgesteld naar 300 m³/uur. Dit kan gerealiseerd worden door middel van frequentieregelaars, 2-toerenventilatoren of de zg. aan/uit regeling, waarbij de ventilator bv. 12 minuten aan en 8 minuten uit staat.

Het circulatiedebiet wordt daarom dus ook bepaald door:

- De luchtverdeling over de kistenstapel
- De gehanteerde circulatienorm

O.a. in het project State-of-the-Art bewaren van tulpenbollen is al veel onderzoek gedaan naar het verbeteren van de luchtverdeling. Resultaat hiervan is dat het verschil tussen het gemiddelde debiet per kist en het debiet van de minst beluchte kist kleiner wordt. De ventilator kan dan teruggetoerd worden, er van uitgaande dat in de oorspronkelijke luchtverdeling de minst beluchte kist voldoende lucht kreeg. Bij de ontwikkeling van computergestuurde circulatie gaat het er in de eerste plaats om om automatisch, dwz. computergestuurd, een gemiddeld gewenst circulatiedebiet per kist te realiseren. Het verbeteren van de luchtverdeling en het bepalen van de optimale circulatienorm zijn in dit onderzoek geen onderwerp.

Bij het circuleren kunnen de volgende scenario's onderscheiden worden:

Scenario 0: circuleren zonder regeling

Scenario 1: sturen van de circulatie op basis van kistentelling en/of meting van het debiet (voor alle bolgewassen)

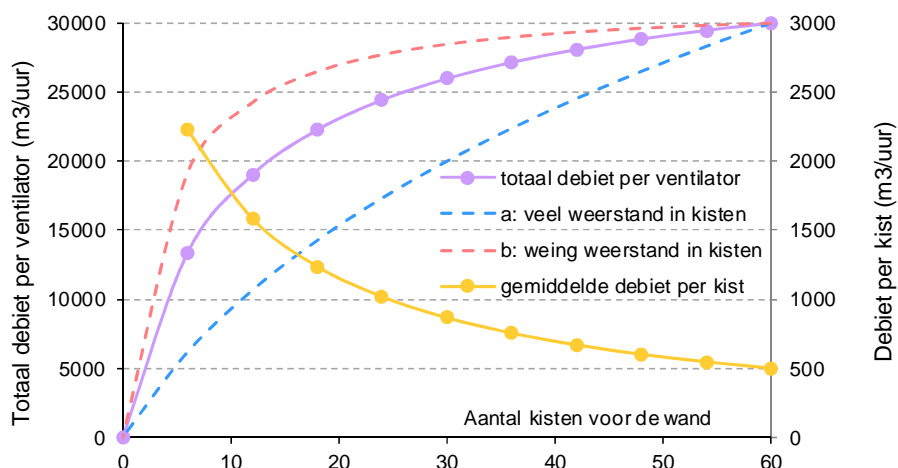
Scenario 2: sturen van de circulatie op basis van ethyleen (alleen voor tulp)

Scenario 3: sturen van de circulatie op basis van ethyleen *en* op basis van kistentelling plus meting van het debiet (alleen voor tulp)

Scenario 1: sturen van de circulatie op basis van kistentelling en/of meting van het debiet.

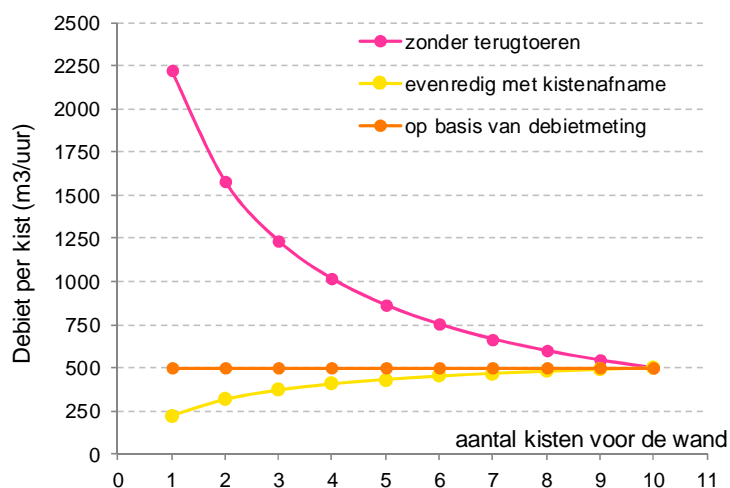
Bij berekeningen met CFD-modellen, en uit metingen in de praktijk, bleek bij het circuleren van leverbare bollen (bij tulp maat 11/12) het debiet ongeveer 20% hoger te zijn dan bij plantgoed (maat 5/8). Ook bij half gevulde kisten is het debiet fors hoger.

Bij het stapsgewijs weghalen van kisten voor de wand neemt het totale debiet af (minder kisten → meer weerstand), maar het debiet per kist neemt toe. In figuur 1 is hiervan een rekenvoorbeeld gegeven. Bij meer weerstand in de kisten (bv. plantgoed maat 5/6) daalt het debiet sterker bij het weghalen van kisten (a) dan bij minder weerstand in de kisten (b).



Figuur 1: Debiet afhankelijk van het aantal kisten en weerstand in kist.

Door automatisch het debiet van de ventilator aan het aantal kisten aan te passen zou in vergelijking met Scenario 0 al veel energie bespaard kunnen worden. Hiervoor zijn een kistenteller (scanner/positiebepaler) *plus* een luchtsnelheidssensor boven de ventilator nodig. Omdat het debiet niet evenredig met het aantal kisten afneemt, kan niet of maar beperkt worden volstaan met alleen maar een kistenteller (tabel 3, Scenario 1a): wanneer er nog maar weinig kisten voor de wand zijn weggehaald, is in het rekenvoorbeeld de afwijking van het gewenste debiet (500 m³/uur) klein. Maar als er veel kisten voor de wand zijn weggehaald wordt de afwijking te groot, zie figuur 2. Bij een automatische aanpassing via een debietmeter + een kistenteller (Scenario 1b) blijft het debiet altijd op het gewenste/ingestelde niveau.



Figuur 2: Terugtoersscenario's

Met een regeling via de klimaatcomputer zou dus fors op energie voor circulatie bespaard kunnen worden, tabel 3. Als slechts 10% van de kisten voor een ventilator weggehaald wordt kan per ventilator door het aanpassen van het debiet al 23 - 27% op elektra bespaard worden, wordt 20% weggehaald dan wordt al 42 - 49% bespaard.

Tabel 3: Gemiddeld debiet per m³ bollen bij het weghalen voor de wand en energiebesparing op circulatie.

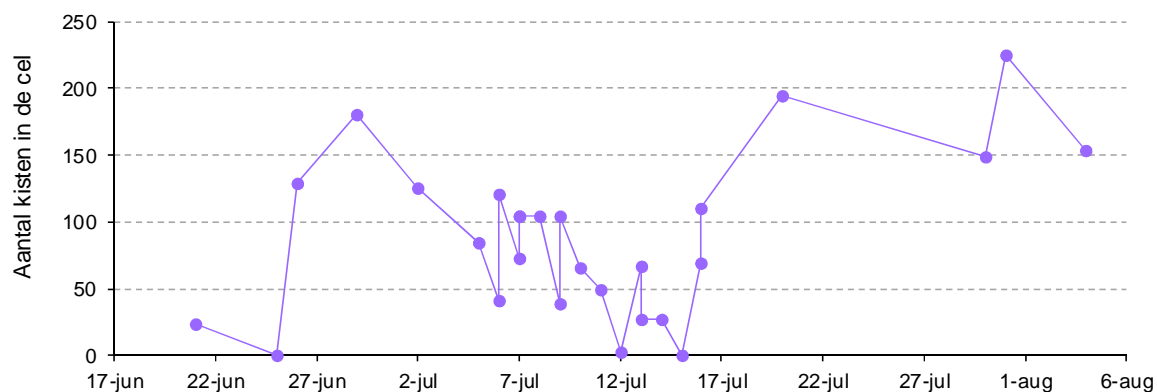
m ³ voor de ventilator	Scenario 0a			Scenario 1a			Scenario 1b		
	zonder regeling			met alleen kistentelling			kistentelling + debietmeting		
	totaal debiet m ³ /uur	debiet per m ³ bollen m ³ /uur	Energie verbruik MJ/m ³	debiet per m ³ bollen m ³ /uur	Energie MJ/m ³	bespaard	debiet per m ³ bollen m ³ /uur	Energie MJ/m ³	bespaard
60	30000	500	1080	500	1080	0%	500	1080	0%
54	29467	546	1200	491	875	27%	500	923	23%
48	28836	601	1350	481	691	49%	500	778	42%
42	28079	669	1543	468	529	66%	500	645	58%
36	27147	754	1800	452	389	78%	500	525	71%
30	25966	866	2160	433	270	88%	500	416	81%
24	24413	1017	2700	407	173	94%	500	321	88%
18	22255	1236	3600	371	97	97%	500	238	93%
12	19001	1583	5400	317	43	99%	500	170	97%
6	13352	2225	10800	223	11	100%	500	123	99%

Ook de ventilatie zou aangepast kunnen worden aan het aantal kisten (Scenario 1c), waardoor ook op verwarming bespaard wordt, tabel 4. Hierin is het totale energieverbruik per m³ bollen voor verwarming + voor elektra bij scenario 1b (alleen de circulatie aan het aantal kisten aanpassen) en bij scenario 1c (ook de ventilatie aan het aantal kisten aanpassen) vergeleken met Scenario 0 (geen enkele aanpassing aan het aantal kisten). De energiebesparing die het gevolg zou zijn van terugtoeren omdat door een grote maat bollen, of door niet volledig gevulde kisten het debiet te hoog is, is in tabel 4 niet mee gerekend.

Tabel 4: Energiebesparingen bij Scenario's 1b en 1c t.o.v. Scenario 0a, $\Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$.

m3 voor de ventilator	Energieverbruik (gas + kWh) per m3			Besparing tov. Scenario 0a	
	Scenario 0a	Scenario 1b	Scenario 1c	Scenario 1b	Scenario 1c
m3	MJ/m3	MJ/m3	MJ/m3	%	%
60	2639	2639	2639	0%	0%
54	2932	2655	2482	9%	15%
48	3298	2727	2337	17%	29%
42	3769	2872	2204	24%	42%
36	4398	3122	2083	29%	53%
30	5277	3534	1975	33%	63%
24	6596	4217	1879	36%	72%
18	8795	5433	1797	38%	80%
12	13193	7963	1729	40%	87%
6	26386	15708	1681	40%	94%

Scenario 1c is van toepassing bij alle bolgewassen en zou op de 28% van de bedrijven (met 43% van het areaal) die een klimaatcomputer en frequentieregelaars hebben, direct toegepast kunnen worden. Ondanks dat het op bijna 40% van de bedrijven mogelijk is om zodra kisten uit de cel worden gehaald het circulatiedebiet via de frequentieregelaar handmatig in te stellen, is het in de praktijk eerder regel dan uitzondering dat dit niet gebeurt. Een praktijkvoorbeeld van de bezetting van een bewaarcel tijdens een deel van het bewaar seizoen waarbij de ventilatie, noch de circulatie werd aangepast (beide continue op 100%) wordt gegeven in figuur 3. De naar tijd gewogen gemiddelde bezettingsgraad is in dit voorbeeld slechts 49%.



Figuur 3: Verandering van het aantal kisten in de cel tijdens een deel van het bewaar seizoen.

Op sectorniveau zou Scenario 1c (kistentelling + debietmeting) miljoenen euro's kunnen besparen alleen al door steeds het debiet van circulatie en ook ventilatie op het aantal kisten aan te passen, tabel 5. Daarnaast wordt met deze regeling automatisch een te hoog circulatiedebiet verlaagd wanneer kisten minder vol, of met grotere bollen gevuld zijn. Deze laatste energiebesparingen liggen per ventilator in de orde van 25 – 45% en zijn in tabel 5 niet meegenomen.

Een variant op dit scenario is om niet het totale debiet per ventilator te meten, maar het debiet in de uitblaasopening voor de minst beluchte laag, of bij de uitblaaspleet van de minst beluchte kist. Dit is alleen mogelijk bij een éénlaagssysteem. In dit systeem krijgt de één na bovenste laag het laagste debiet. In die

laag krijgen de 2-3 kisten het dichtst bij de systeemwand minder lucht dan de kisten aan het eind van het palletkanaal. In een tweelaagssysteem is zo'n regeling niet mogelijk.

Tabel 5: Direct mogelijke en potentiële jaarlijkse energiebesparing door aanpassing aan het aantal kisten, Scenario 1c.

		elektra		gas		totaal	
totaal areaal bedrijven > 5 ha (CBS, 2009)						22.619	ha
energie/ha		7513	kWh	1970	m3	136.908	MJ
energie totaal areaal		169.925	GWh	44.565	1000 m3	3,10	PJ
aandeel bewaring		50%		90%			
totaal bewaring		84.962	GWh	40.108	1000 m3	0,77	PJ
Kosten		10,2	mIn€	10,0	mIn€	20,2	mIn€
<u>Potentiele besparing gehele sector</u>							
Celbezetting 90%	energie	19.599	GWh	4.011	1000 m3	0,32	PJ
	€uro	2,4	mIn€	1,0	mIn€	3,35	mIn€
		23%		10%		17%	
Celbezetting 80%	energie	35.980	GWh	8.022	1000 m3	0,61	PJ
	€uro	4,3	mIn€	2,0	mIn€	6,3	mIn€
		42%		20%		31%	
Celbezetting 70%	energie	49.419	GWh	12.032	1000 m3	0,87	PJ
	€uro	€ 5,9	mIn€	3,01	mIn€	8,9	mIn€
		58%		30%		44%	
<u>Bij toepassing op 43% van het areaal</u>							
Celbezetting 90%	energie	8.428	GWh	1.725	1000 m3	0,14	PJ
	€uro	1,0	mIn€	0,4	mIn€	1,44	mIn€
Celbezetting 80%	energie	15.472	GWh	3.449	1000 m3	0,26	PJ
	€uro	1,9	mIn€	0,9	mIn€	2,72	mIn€
Celbezetting 70%	energie	21.250	GWh	5.174	1000 m3	0,37	PJ
	€uro	2,6	mIn€	1,3	mIn€	3,84	mIn€

*kWh-prijs: €0,12, gasprijs: €0,25

Scenario 2: circulatiesturing op basis van ethyleen (alleen geschikt voor tulp)

Bij de circulatie van tulp speelt naast het minimaliseren van temperatuur- en RV- verschillen tussen kisten vooral de afvoer van ethyleen een rol. Zonder ethyleenmeting is Scenario 0 van toepassing: circuleren volgens de norm met 500 m3/uur, gecombineerd met ventileren volgens de norm met 100 m3/uur per m3 bollen. Deze norm is gebaseerd op de richtlijn om het ethyleengehalte van de cellucht onder de absoluut veilige schadedrempel van 100 ppb te houden. Bij een gemiddelde ethyleenproductie van 0,15 ml per dag per zure bol en een maximaal percentage zure bollen van 5% zijn deze ventilatie- en circulatienorm voldoende om ethyleenschade te voorkomen. De geïnstalleerde ventilatie- en circulatiecapaciteit in de bewaarcel zijn hierop afgestemd.

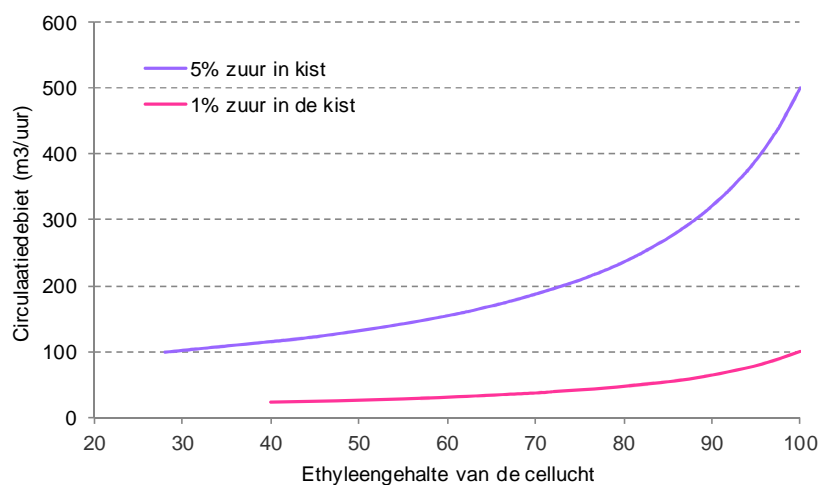
Met een ethyleenanalyse is het mogelijk de ventilatie op de ethyleenproductie aan te passen zodat bv. bij 2,5% zure bollen de ventilatie tot 50 m3/uur teruggebracht kan worden. Dit bespaart dan 50% op gas.

Het gemiddelde ethyleengehalte tussen de bollen in een kist kan berekend worden met:

$$e^{cel} = \frac{P^{cel}}{V} + e^{buiten} \quad \text{en} \quad e^{kist} = \frac{P^{kist}}{C} + e^{cel}, \quad \text{zodat:} \quad e^{kist} = \frac{P^{kist}}{C} + \frac{P^{cel}}{V} + e^{buiten}$$

waarin e^{cel} = ethyleengehalte van de cellucht
 P^{cel} = ethyleenproductie in de cel
 V = Ventilatie-debiet
 e^{buiten} = ethyleengehalte van de buitenlucht
 e^{kist} = ethyleengehalte van de lucht tussen de bollen in de kist
 P^{kist} = ethyleenproductie door de bollen in de kist
 C = Circulatie-debiet

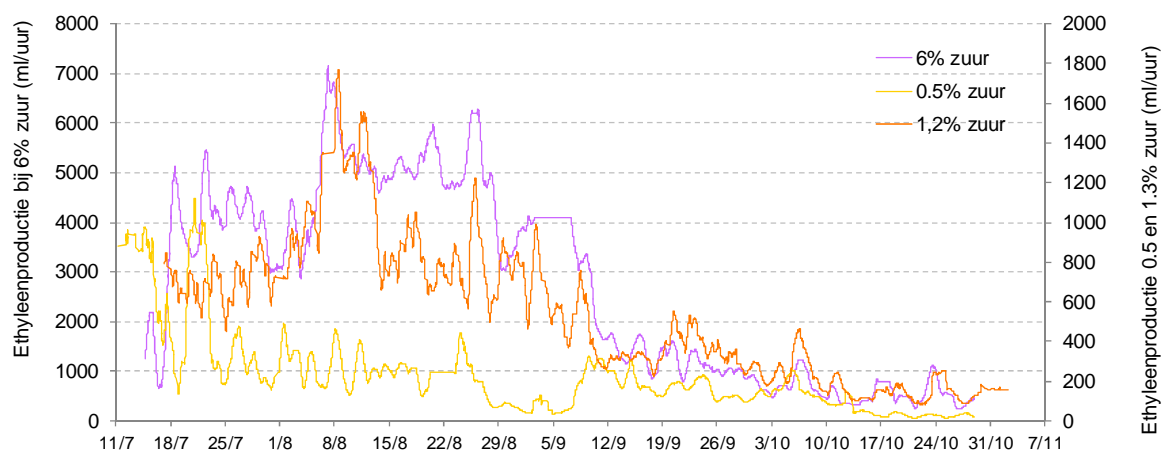
Indien het ethyleengehalte van de buitenlucht 10 ppb is, is het ethyleengehalte bij 5% zure bollen in de cel en in elke kist, bij ventilatie en circulatie volgens de norm respectievelijk 100 ppb in de cellucht en 118 ppb tussen de bollen. Is door een gemiddeld lager percentage zure bollen, of door een lagere ethyleenproductie per zure bol, of door meer ventilatie, het ethyleengehalte van de cellucht lager dan 100 ppb dan kan voor een kist met 5% zure bollen de circulatie fors omlaag om het ethyleengehalte in de kist toch onder de 118 ppb te houden. Is het percentage zure bollen in de kist slechts 1%, dan kan bij een ethyleengehalte van de cellucht van bv. 40 ppb de circulatie zelfs naar 25 m³/uur worden teruggebracht, figuur 4.



Figuur 4: Minimaal circulatiedebiet en ethyleengehalte cellucht.

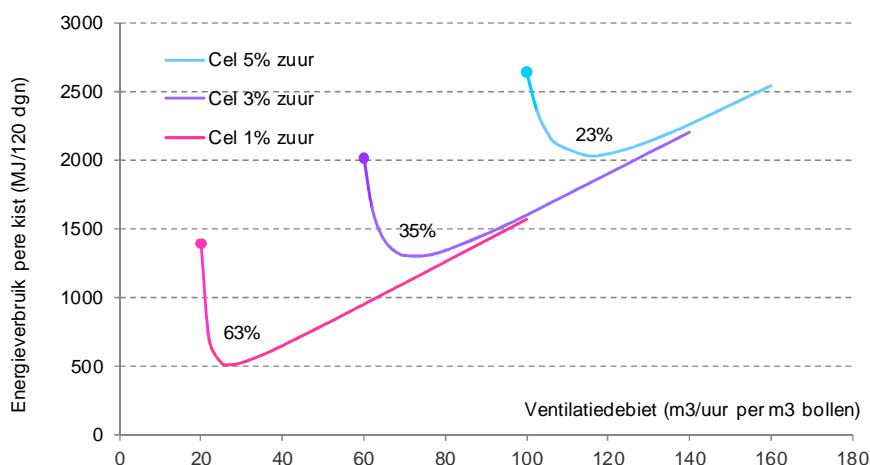
Wordt de ventilatie volledig op ethyleen gestuurd met een ingestelde ethyleengrens van 100 ppb, dan is ook bij lagere percentages zuur het ethyleengehalte van de cellucht altijd 100 ppb. De lucht tussen de bollen in een kist met daarin 5% zure bollen heeft dan een ethyleengehalte van gemiddeld 118 ppb, een kist met daarin 1% zure bollen gemiddeld 104 ppb. Wordt de ventilatie gestuurd door het gemeten ethyleengehalte dan kan dus een regeling ontworpen worden waarbij de som van het energieverbruik voor ventilatie en circulatie minimaal is. Met de huidige techniek is het te duur om het ethyleengehalte in elke kist te meten (een ethyleenanalyser kost ruim €7600,-). Zelfs wanneer de ethyleenproductie in de cel een gemiddeld percentage zure bollen van minder dan 1% aangeeft moet er bij het ontwerp van een regeling daarom van worden uitgegaan dat er in een rij voor de ventilator kisten tussen staan met 5% zure bollen.

De ethyleenproductie in een cel hangt van veel factoren af: de ethyleenproductie per zure bol, het percentage zure bollen, de totale hoeveelheid bollen in de cel, de temperatuur en de RV. Door besmetting kan het percentage zure bollen toenemen, of door sorteren/uitzoeken afnemen. Daarnaast produceren ook gezonde bollen meer ethyleen net na het verwerken (pellen en sorteren) en door het verwerken en overstorten neemt ook de kans op besmetting toe. Wanneer hierdoor in een volle cel de ethyleenproductie verandert kunnen de ventilatie en de circulatie hierop aangepast worden. Hoe de ethyleenproductie in de loop van het bewaar seizoen in enkele praktijksituaties verandert is samengevat in figuur 5. Vanaf augustus neemt de ethyleenproductie af.



Figuur 5: Ethyleenproductie in de cel tijdens het bewaar seizoen

Uit figuur 4 volgt dat wanneer door bv. 20% meer te ventileren het ethyleengehalte van de cellucht op 80 ppb gehouden kan worden, de circulatie dan terug kan naar 250 m³/uur. Het ethyleengehalte in een kist met 5% zuur blijft dan op 118 ppb. Op elektra wordt dan $1 - (250/500)^3 \approx 80\%$ bespaard. Zonder debietmeter of kistenteller kan er met dit principe, Scenario 2, in een volle cel al fors bespaard worden, figuur 6.



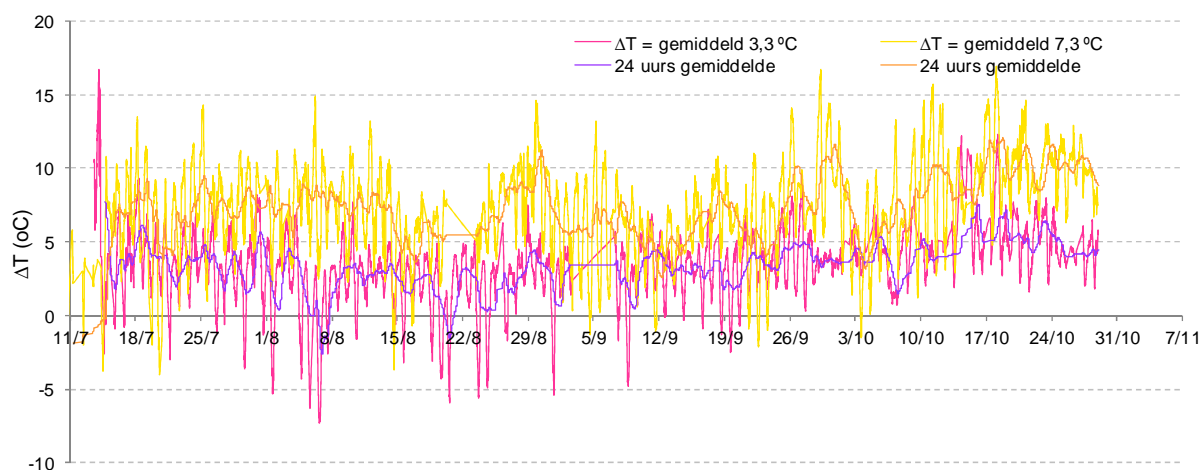
Figuur 6: Minimaliseren som energieverbruik ventilatie + circulatie ($\Delta T = 4$)

In deze figuur is voor 3 situaties bij een gemiddeld temperatuurverschil met de buitenlucht van 4 °C ($\Delta T = 4$) over een bewaar duur van 120 dagen de som van het energieverbruik per kist voor ventilatie + circulatie

weergegeven als functie van het ventilatiedebiet. Het totale energieverbruik, wanneer de circulatie niet gestuurd wordt en de ventilator op 100% toeren draait (het gemiddeld circulatiedebiet is dan in principe 500 m3/uur) is in figuur 6 aangegeven door de bolletjes. In een volle cel met een ethyleenproductie die overeenkomt met 5% zure bollen in alle kisten is het energieverbruik voor ventilatie + circulatie dan bij ventileren met 100 m3/uur per kist 2600 MJ/kist per 120 dagen. Door meer te ventileren daalt het ethyleengehalte en hoeft er minder gecirculeerd te worden. Tot een ventilatiedebiet van 115 m3/uur neemt het totale energieverbruik af met 23%. Bij een lager gemiddeld percentage zuur, maar wel 5% zuur in een individuele kist, wordt minder geventileerd om het ethyleengehalte van de cellucht onder de 100 ppb te houden en is het energieverbruik voor ventilatie + circulatie bij 100% circulatie 2000 MJ/kist als het gemiddelde percentage zuur 3% is, en 1420 MJ bij 1% zuur. Het ethyleengehalte in de kist met 5% zure bollen blijft ≤ 118 ppb. Er kan dan respectievelijk 35% en 63% energie bespaard worden door méér te ventileren dan noodzakelijk om het ethyleengehalte van de cellucht onder de 100 ppb te houden, waardoor er minder gecirculeerd hoeft te worden. Deze energiebesparingsmogelijkheid hangt af van ΔT : hoe hoger ΔT , hoe hoger het energieverbruik voor de ventilatie, hoe minder energie er met dit scenario bespaard wordt, tabel 6.

Tabel 6: Energieverbruik per kist per 120 dagen bij een ΔT van 2 tot 8 °C, 1 - 5% zuur in de cel en 5% zuur in de kist, $e^{kist} \leq 118$ ppb (Scenario 2a).

Zuur % cel	ΔT °C	Ventilatie m3/uur	e^{cel} ppb	Energie Ventilatie MJ/kist	Circulatie m3/uur	Energie Circulatie MJ/kist	Totaal Energie MJ/kist	Besparing %
1%	2	30	70	234	187	56	290	77%
	4	27	77	421	217	88	509	63%
	6	26	79	608	231	107	714	54%
	8	26	79	810	231	107	917	46%
3%	2	80	78	623	221	93	717	54%
	4	75	82	1169	249	133	1302	35%
	6	70	87	1637	291	213	1849	26%
	8	68	90	2104	321	286	2390	19%
5%	2	125	82	974	249	133	1108	40%
	4	115	88	1792	302	238	2030	23%
	6	113	90	2630	321	286	2916	15%
	8	110	92	3429	343	349	3778	10%



Figuur 7: ΔT (celtemperatuur min buitentemperatuur) gedurende het bewaarseizoen.

Voor 2 uiteenlopende praktijksituaties is ΔT in de loop van het bewaarseizoen in figuur 7 samengevat. Omdat het energetisch niet uitmaakt of ventilatielucht van bv. 2 naar 4 °C of van 18 naar 20 °C moet worden opgewarmd valt uit de gewogen gemiddelde ΔT af te leiden dat er met dit scenario veel energie te besparen is.

Het hierboven beschreven scenario met tulp gaat uit van een volledig gevulde cel waarin in de loop van het bewaarseizoen de ethyleenproductie afneemt: Scenario 2. Wanneer de ethyleenproductie echter vermindert door het weghalen van kisten ontstaat een andere situatie. Wordt de ventilatie gestuurd op de ingestelde ethyleengrens van 100 ppb, maar de circulatie wordt niet aangepast (Scenario 0b), dan blijft bij het weghalen van kisten het energieverbruik *per kist* (per m3 bollen) voor verwarming van de ventilatielucht gelijk, maar het energieverbruik voor de circulatie neemt fors toe, tabel 7.

Tabel 7: Energieverbruik per m3 bollen, Scenario 0b, $\Delta T = 4$.

m3 voor de ventilator	Ventilatie	Circulatie		Energieverbruik per m3 bollen		
	Ethyleen gestuurd	totaal	per m3	Ventilatie	Circulatie	totaal
m3	m3/uur	m3/uur	m3/uur	MJ/m3	MJ/m3	MJ/m3
60	100	30000	500	1559	1080	2639
54	90	29467	546	1559	1200	2759
48	80	28836	601	1559	1350	2909
42	70	28079	669	1559	1543	3101
36	60	27147	754	1559	1800	3359
30	50	25966	866	1559	2160	3719
24	40	24413	1017	1559	2700	4259
18	30	22255	1236	1559	3600	5159
12	20	19001	1583	1559	5400	6959
6	10	13352	2225	1559	10800	12359

Bij het weghalen van kisten, aangenomen dat de zure bollen ongeveer gelijk over de kisten verdeeld zijn, neemt de ethyleenproductie in de cel evenredig af. Wordt de circulatie dan volgens Scenario 2 aan de verminderde ethyleenproductie aangepast dan wordt het totale energieverbruik per kist (energie voor verwarming van de ventilatielucht + energie voor de circulatie) geminimaliseerd. De computer "weet" dan echter niet dat er minder kisten staan en gaat minder terugtoeren dan mogelijk is, tabel 8. In de

Tabel 8: Energieverbruik bij aanpassing op aantal kisten volgens Scenario 2, $\Delta T = 4$.

m3 voor de ventilator	Ventilatie	Circulatie		Energieverbruik per m3 bollen			Circulatie volle rij
	Ethyleen gestuurd	totaal	per m3 bollen	Ventilatie	Circulatie	totaal	
m3	m3/uur	m3/uur	m3/uur	MJ/m3	MJ/m3	MJ/m3	m3/uur
60	115	18120	302	1792	238	2030	302
54	105	17150	318	1818	237	2055	286
48	95	16091	335	1851	235	2085	268
42	83	15949	380	1837	283	2120	266
36	75	14551	404	1948	277	2225	225
30	60	12931	431	1870	267	2137	235
24	50	12158	507	1948	333	2282	203
18	40	9837	546	2078	311	2389	164
12	28	8018	668	2143	406	2549	134
6	15	4994	832	2338	565	2903	83

berekeningen voor deze tabel is uitgegaan van 5% zure bollen in elke kist. Vergeleken met Scenario 0b wordt er dan wel energie bespaard, maar er wordt naar mate er minder kisten voor de wand staan toch

overmatig gecirculeerd en er kan dus nog meer energie bespaard worden. In de berekeningen voor tabel 8 wordt er ook van uitgegaan dat van elke rij voor de wand evenveel kisten worden weggehaald. In de praktijk worden in een bewaarcel van sommige rijen geen kisten weggehaald, van andere juist meer dan gemiddeld. De klimaatcomputer “weet” niet van welke rijen dat het geval is. In tabel 8 is daarom ook het resulterende circulatiedebiet bij dit scenario aangegeven voor een rij waar geen kisten van zijn weggehaald: de kisten in die rij krijgen dan te weinig lucht.

Scenario 2 geeft bij nagenoeg volledig gevulde cellen een forse besparing op energie, met behoud van een optimaal bewaarklimaat. Bij het weghalen van kisten wordt echter overmatig gecirculeerd. Bovendien moeten van elke rij evenveel kisten weggehaald worden omdat volle rijen anders te weinig lucht krijgen. In de praktijk geeft dit scenario daarom te veel risico en te weinig flexibiliteit.

Met een kistenteller *plus* een debietmeter per rij kan dit worden voorkomen en krijgen de kisten per rij gemiddeld de juiste hoeveelheid lucht voor een optimaal bewaarklimaat, **Scenario 3**, tabel 9.

Tabel 9: Energieverbruik per m3 bollen bij 5% zure bollen, Scenario 3, $\Delta T = 4$.

m3 voor de ventilator	Ventilatie	Circulatie		Energieverbruik per m3 bollen			Energie-besparing	
	Ethyleen gestuurd	totaal	per m3	Ventilatie	Circulatie	totaal	tov. Scenario 0a	tov. Scenario 0b
m3	m3/uur	m3/uur	m3/uur	MJ/m3	MJ/m3	MJ/m3		
60	115	18120	302	1792	238	2030	23%	23%
54	105	15714	291	1818	182	2000	32%	27%
48	95	13392	279	1851	135	1986	40%	32%
42	83	11928	284	1837	118	1955	48%	37%
36	75	9648	268	1948	81	2029	54%	40%
30	60	7470	249	1870	51	1922	64%	48%
24	50	5976	249	1948	40	1988	70%	53%
18	40	3978	221	2078	21	2099	76%	59%
12	28	2532	211	2143	13	2156	84%	69%
6	15	1122	187	2338	6	2344	91%	81%

Met dit scenario wordt het energieverbruik voor ventilatie + circulatie geminimaliseerd afhankelijk van ΔT en de ethyleenproductie *en* wordt het circulatiedebiet aangepast aan het aantal kisten voor de wand *en* aan de kistinhoud (bolmaat, vulling). Met dit laatste is in de berekening van de energiebesparing in tabel 9 geen rekening gehouden. In de tabel is ook uitgegaan van 5% zure bollen in elke kist. T.o.v. Scenario 0a zijn bij een lager percentage zure bollen de besparingen in de praktijk dus nog veel groter.

De hierboven beschreven scenario's zijn samengevat in tabel 10. In alle scenario's 1 en 2 is er bij de berekeningen van het minimale circulatiedebiet van uit gegaan dat er in de rijen kisten tussen staan met 5% zure bollen, en dat ook in deze kisten het bewaarklimaat optimaal moet zijn.

Is het percentage zure bollen in elke kist echter lager dan 5% dan kan ook met een veel lager debiet toe. Een ander scenario zou er daarom een kunnen zijn waarbij in elke kist het ethyleengehalte gemeten wordt. De ethyleensensoren zouden dan zeer goedkoop moeten zijn en een heel laag energieverbruik moeten hebben om deze draadloos in elke kist te kunnen monteren. Dergelijke sensoren bestaan nog niet, maar in Bijlage 1 wordt een nano-technologisch principe beschreven dat hierop misschien perspectief biedt (zie: <http://www.owlstonenanotech.com>).

Voor een optimaal bewaarklimaat en een minimaal energieverbruik zijn scenario's 1c, 2 en 3 het geschiktst. Bij scenario 1c moet vooraf een gewenst gemiddeld circulatiedebiet ingesteld worden. Bij scenario's 2 en 3 wordt aan het begin van het bewaarseizoen ook vooraf een gewenst gemiddeld circulatiedebiet ingesteld, maar dit debiet wordt in de loop van het bewaarseizoen, wanneer de ethyleenproductie zakt, automatisch aangepast. Scenario 2 is alleen geschikt bij continue volledig gevulde cellen. Scenario's 2 en 3 zijn alleen geschikt voor tulp, scenario's 1 zijn geschikt voor alle gewassen. Scenario 1c kan daarom op een veel groter areaal worden toegepast dan scenario 2 of 3.

Tabel 10: Samenvatting Scenario's voor computergestuurde circulatie.

Scenario	Principe	Sensoren	Gewassen	Voor- / nadeel	Energiebesparing
0a	geen enkele regeling	geen	alle	overmatig ventileren en circuleren	geen
0b	ethyleen gestuurde ventilatie	ethyleen analyser	alleen tulp	overmatig circuleren, maar niet <i>meer</i> ventileren dan nodig	alleen op gas: gemiddeld 50%
1a	circulatie aanpassen aan aantal kisten	afstandsensor	alle	teveel terugtoeren bij weinig kisten voor de wand, geen aanpassing aan kistinhoud	≤ 50% op elektra bij celbezetting van 80%
1b	circulatie aanpassen aan aantal kisten + gemiddeld debiet	afstandsensor + luchtsnelheids meter	alle	gemiddeld debiet circulatie altijd voldoende, ook aanpassing aan kistinhoud	> 50% op elektra bij celbezetting van 80%
1c	als 1b, maar ook de ventilatie aanpassen aan aantal kisten	idem	alle	idem, plus per kist niet boven de norm ventileren	> 50% op elektra + 30% op gas bij celbezetting van 80%
2	minimaliseren som energieverbruik ventilatie + circulatie	ethyleen analyser	alleen tulp	alleen geschikt voor volle cellen, niet geschikt bij weghalen kisten	20 - 60% op som elektra + gas, afhankelijk van zuur% en ΔT
3	als 2, + aanpassen aan aantal kisten + gemiddeld debiet	ethyleen analyser + afstandsensor + luchtsnelheids meter	alleen tulp	gemiddeld debiet altijd voldoende, aanpassing aan aantal kisten en kistinhoud: minimaal energieverbruik optimaal bewaarklimaat	> 20 - 60% op som elektra + gas, afhankelijk van bolmaat, kistvulling, aantal kisten voor de wand, zuur% en ΔT

3.2 Sensoren

Om computergestuurde circulatie mogelijk te maken zijn sensoren noodzakelijk om direct, of indirect de luchtsnelheid te kunnen meten en om het aantal kisten voor de ventilator te kunnen scannen. De sensoren dienen aan een aantal voorwaarden te voldoen:

- ze moeten voldoende robuust zijn
- moeten bestand zijn tegen het toepassen van Actellic
- geen draaiende delen bevatten omdat deze kwetsbaar en gevoelig voor vervuiling zijn
- een geschikt meetbereik hebben
- niet al te richtingsgevoelig zijn
- als onderdeel van een klimaatregeling kunnen functioneren (elektrisch signaal)
- weinig (periodiek)onderhoud nodig en voldoende levensduur hebben
- eenvoudig te kalibreren zijn
- en het meetsysteem moet economisch haalbaar zijn

3.2.1 Luchtsnelheid

In tabel 11 wordt een beknopt overzicht gegeven van de verschillende principes waar luchtsnelheids-sensoren op gebaseerd zijn. Het vereiste bereik om bij de inlaat van een circulatieventilator de luchtsnelheid te meten is maximaal 10 – 15 m/s, bij de uitblaasopening van de minst beluchte laag kisten in een éénlaagssysteem is dat 6 – 9 m/s. Richtingsgevoeligheid is door de manier van installeren geen probleem.

Tabel 11: Overzicht luchtsnelheidssensoren.

Principe	Bereik	Richtingsgevoelig	Toepassing
Thermische geleiding	0 - 20	nee	Luchtkanalen (HVAC)
Cup anemometer	0,2 - 40	nee	Weerstations
Meetventilator	0,2 - 40	ja	Algemeen, heel divers
Pitotbuis	0 - >100	ja	Luchtkanalen, vliegtuigen
Venturi	0 - >100	ja	Algemeen, heel divers
Vortex	0,2 - 40	ja	Laboratorium en industrieel
Akoestisch	0 - 40	ja	o.a weerstations
Laser Doppler	> 100	ja	Zeer hoge snelheden



Figuur 7: De hetedraadsensor EE576.

De thermische anemometer bestaat uit een edelmetaaldraad of metaalfilm die elektrisch verwarmd wordt tot boven de omgevingstemperatuur. Een langsstromende luchtstroom koelt de draad dan af. Het elektrisch vermogen om deze afkoeling te compenseren is een maat voor de luchtsnelheid. Deze compensatie verschilt per uitvoering. Sommige typen bestaan uit twee metaaldraden die op een verschillende temperatuur gehouden worden, het verschil in elektrisch vermogen is een maat voor de luchtsnelheid. De hittedraad anemometer is heel geschikt voor lage luchtsnelheden van 0,2 m/s, is in principe niet

richtingsgevoelig en is compact. Dit type sensor reageert zeer snel op veranderingen in luchtsnelheid (korte reactietijd) en meet in een klein gebied. Nadeel is dat deze sensor gevoelig is voor vervuiling, bij het type metaalfilm is dit sterk verbeterd. De sensor EE576, figuur 7, maakt gebruik van het principe van thermische geleiding. Het energieverbruik voor het opwarmen van de metaalfilm is bij batterijtoepassing wat minder geschikt maar in de praktijk toch goed oplosbaar. Vanwege het meetbereik, de robuustheid, de compactheid en de lage prijs is deze sensor geschikt voor dit project. Nadeel is de gevoeligheid voor vervuiling (actellic), maar wellicht is een regeling denkbaar waarbij tijdens de actellictoepassing de sensor afgeschermd wordt. De kostprijs is ongeveer € 170,-, door rechtstreekse bestelling bij de fabrikant en bij grotere aantallen wordt korting gegeven.

De solid state windsnelheid- en windrichting sensor MW22 van Mierij Meteo bestaat uit een keramische plaat met een temperatuur sensor op de 4 hoeken. In het midden van de keramische plaat wordt warmte opgewekt, uit de verdeling van de warmte en de warmteafgifte wordt de snelheid en richting berekend. De minimale luchtsnelheid is 0,2 m/s, boven de 0,5 m/s is ook de windrichting beschikbaar. De kostprijs is € 492,- pst maar daalt bij grotere aantallen. De sensor is een ontwikkeling van TU Delft, wordt in Nederland gefabriceerd en kan op klantspecificaties aangepast worden. De benodigde voeding is 12V bij een stroom van 130 mA. Bij de laatste ontwikkeling wordt de stroom 50 mA, waardoor batterijvoeding weer haalbaar is. De technische specificaties zijn te vinden op: www.mierijmeteo.nl



Figuur 8: Sensor MW22

De cup-anemometer, figuur 8, is een ronddraaiend molentje met drie of vier halve bollen (cups) die met stangetjes aan een verticaal draaibare as zijn bevestigd. De halve bollen zijn van binnen hol. De luchtstroom oefent op de holle zijde meer kracht uit dan op de bolle zijde, waardoor het molentje in beweging komt. De hoeksnelheid van de verticale as wordt omgezet in een elektrisch signaal voor verdere verwerking. Door de massa-traagheid treedt een dempende werking op. De cup-anemometer is niet richtingsgevoelig, meet rechtstreeks de windsnelheid, is vrij kwetsbaar en wordt veel toegepast in weerstations. De cup-anemometer lijkt door zijn kwetsbaarheid en de minimale aanloopsnelheid niet geschikt voor dit project.



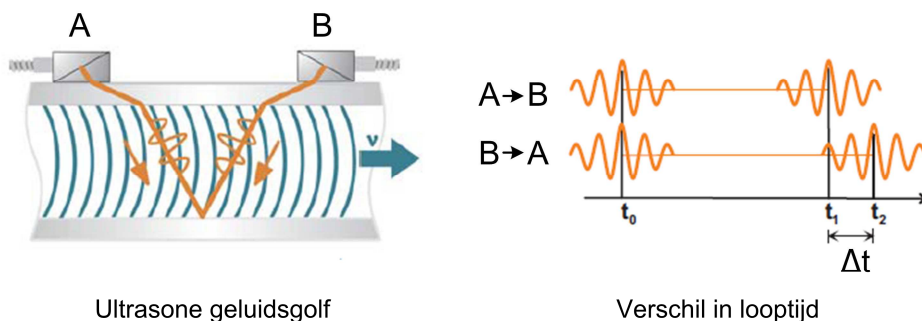
Figuur 9: Cup anemometer MA

Het principe van de meetventilator (vleugelrad anemometer) is gebaseerd op het feit dat een vleugelrad roteert met een snelheid die proportioneel is aan de



Figuur 10: Meetventilator.

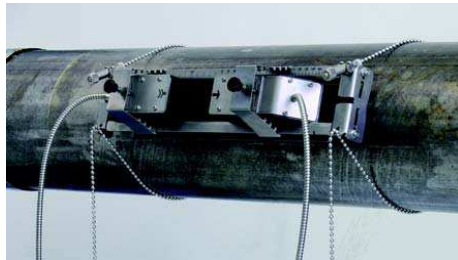
luchtsnelheid. De vleugelrad is verkrijgbaar in doorsneden van enkele millimeters tot 20 cm (en zo nodig meer). De kleinere doorsneden zijn meer geschikt voor het meten van vloeistofstromen (0.2 – 120 m/s) terwijl de grotere diameters geschikt zijn voor het meten van gasstromen. Het meetprincipe van de ultrasone (akoestische) anemometer is gebaseerd op het verschil in looptijd van een ultrasone geluidsgolf van A naar B en van B naar A. Het verschil in looptijd (Figuur 5) is een maat voor de stroomsnelheid van het medium. Een ingebouwde micro processor zorgt voor het genereren van de geluidsimpuls en de verwerking van het ontvangen signaal, storingen en foutieve signalen worden uitgefilterd.



Figuur 11: Meetprincipe gebaseerd op het verschil in looptijd

De ultrasone sensor is richtingsgevoelig. Door toepassing van meerdere zenders en ontvangers kan de richting 2D maar ook 3D bepaald worden. De sensor bevat geen bewegende delen, kan zeer nauwkeurig en snel meten en is afhankelijk van de uitvoering robuust en vraagt weinig tot geen onderhoud. De zender en ontvanger kunnen eventueel naast elkaar gemonteerd worden en de geluidsgolf laten reflecteren op een tegenoverliggend trefplaat. De ultrasone anemometer is geschikt maar de prijs is wel hoog. In figuur 12 staan 3 afbeeldingen van ultrasone meetsystemen. Ultrasone meetsystemen zijn niet geschikt voor batterijvoeding en moeten dus stationair opgesteld worden, bv. bij de ventilatoren of in de drukwand.

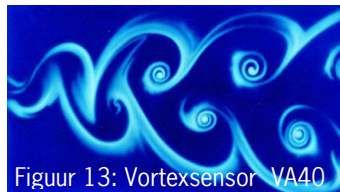
Links is een 2D anemometer van Wittich en Visser (www.wittich.nl) afgebeeld, dit is een Nederlands bedrijf dat in staat is om klantspecifieke oplossingen te bouwen. In het midden transmitters/receivers van Flexim (www.flexim.com), dit is een internationaal bedrijf dat zich vooral gespecialiseerd heeft een gas en vloeistofstromen in industriële en laboratoriumopstellingen. De kwaliteit van deze systemen is hoog, maar



Figuur 12: Ultrasonische anemometers

een basismeetsysteem kost als snel €10.000,-. Rechts het meetsysteem Enotemp van Innovationhandling (www.humitemp.com). Dit systeem is speciaal gebouwd om de luchtstromen in de warmtewisselaars van het Watergy project (www.watergy.de) te meten. Volgens een indicatie van Innovationhandling is een prijs onder de €1000,- per transmitter/receiver en een basisstation haalbaar.

Een vortex Kármán sensor werkt door het verstoren van een laminaire luchtstroom door een boog- of wigvorm. Achter deze wig ontstaat een patroon van draaikolken. De verschillen in luchtdruk die daardoor ontstaan, figuur 13, produceren een frequentie die evenredig is met de luchtsnelheid. Dit type sensor bevat geen bewegende delen, is robuust, compact en is maar weinig gevoelig voor vervuiling. Het bereik is 0.5 – 40 m/s.

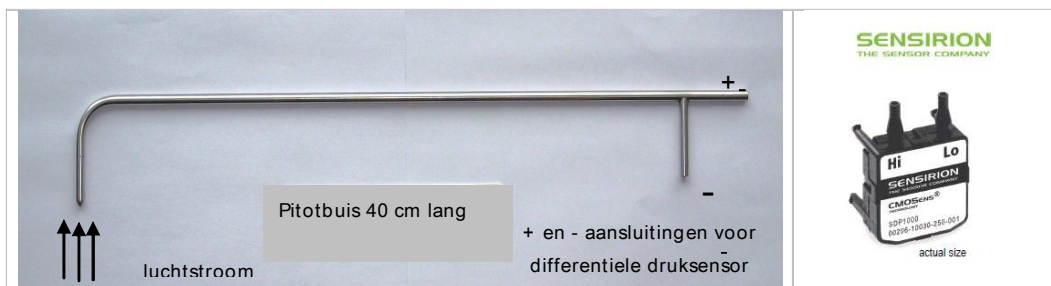


Figuur 13: Vortexsensor VA40



Laser Doppler anemometers maken gebruik van een laserbundel die opgesplitst is in twee delen. Een deel van de laserbundel gaat door de buitenlucht en wordt gereflecteerd door deeltjes die met de lucht meebewegen. Het gereflecteerde laserlicht wordt weer vergeleken met de laserbron. Als de deeltjes snel bewegen treedt het Doppler effect op. Hieruit kan de snelheid van de deeltjes die overeenkomt met de luchtsnelheid bepaald worden. Deze apparatuur is vooral geschikt om zeer hoge snelheden te meten, is omvangrijk en heel duur en is daarom niet geschikt.

De Pitotbuis is een instrument voor het meten van de druk in een gas- of vloeistofstroom. In een luchtstroom is het principe van deze meetmethode gebaseerd op het verschil tussen de som van de statische druk en de dynamische druk veroorzaakt door de luchtsnelheid. Uit het drukverschil kan de snelheid van de stroom berekend worden. Afhankelijk van de uitvoering van de pitotbuis zelf en de gevoeligheid van de sensor die het drukverschil meet is een zeer grote range mogelijk, i.d.g. van 0 – 20 m/s. Omdat er geen doorstroming maar alleen druk gemeten wordt is dit systeem weinig gevoelig voor vervuiling. De recent ontwikkelde druksensor SDP1000 van Sensirion is zeer geschikt vanwege het goede meetbereik, is robuust en prijsgunstig (\leq €100,-). De schatting van de Pitotbuis is onder de €100,-.



Figuur 14: Pitotbuis en de differentiële druksensor SPD 1000 van Sensirion

Met de thermische druksensor worden drukverschillen gemeten. Dit is in principe een thermische



flowsensor met als groot verschil dat hier de doorstroming zeer laag is. Dit model is door zijn meetbereik, stabiele analoge uitgang, en gunstige prijs zeer geschikt. De sensor kan eventueel bij een meetzender ingebouwd worden.

De membraansensoren kunnen goedkoop gefabriceerd worden maar zijn gevoelig voor drift en kunnen geen overbelasting verdragen. Dit model is minder geschikt dan de thermische druksensor die van een later ontwikkeling is. Honeywell is een bekende leverancier van membraansensoren.

Met druksensoren kan het drukverschil tussen de systeemwand en de cel (ΔP) gemeten worden. Door tegelijkertijd het energieverbruik (E) van de ventilator te meten (doorgaans via de frequentieregelaar) kan dan in principe het debiet bepaald worden via: $\text{Debiet} = f \times E / \Delta P$. De meting van het energieverbruik is echter onnauwkeurig, en afhankelijk van het ventilatortype is ook " f " echter niet altijd voldoende constant.

Tabel 12: Samenvatting luchtsnelheids- en druksensoren.

Principe	Type	Bereik (m/s)	Nauwkeurigheid	Robuustheid, stofgevoeligheid e.d.	kosten (richtlijn)	levensduur (richtlijn)	Toepassing
Hittedraad anemometer	EE576 Sensirion	0 - 20	5%	Stofgevoelig, meetdraad kwetsbaar	€ 170,-	> 5 jaar	Luchtkanalen (HVAC)
Thermische geleiding	MW22 Mierij Meteo	0 - 30	1%	Ongevoelig voor stof en vervuiling, zeer robuust, geen slijtage van onderdelen	€ 500,-, kwantumkorting	> 10 jaar	Maatwerk mogelijk
Heatbulb NTC 3 mm	Testo 0628 0035	0-10	< 1%	Robuust (een goede behuizing vereist), geen slijtage onderdelen	€500,-, kwantumkorting	10 jaar	Algemeen
Cup anemometer	MAX40	0.2 - 40	< 1%	Kwetsbaar voor deze toepassing	€500,-	10 jaar	Weerstations
Meetventilator	Testo 0635 9340	0.2..40	<1%	Kwetsbaar voor deze toepassing		10 jaar	Algemeen
Venturi	-	0 > 100	1%	-	?	onbeperkt	Algemeen, heel divers
Vortex	CATEC	-	-	Zeer robuust, enigszins gevoelig voor vuil	€1000,-	> 10 jaar	Laboratorium en industrieel
Akoestisch	Flexim	0 - 40	< 1%	Zeer robuust, totaal ongevoelig voor vervuiling en stof.	> €2000,-	10 jaar	Speciaal voor metingen in luchtkanalen en leidingen
Akoestisch	Enotemp Innovationhandling	0 - 40	3%	Afhankelijk van de uitvoering niet gevoelig voor stof en vervuiling.	€500 – 1000	10 jaar	Volledig maatwerk
Akoestisch	CATEC Wittich en Visser	0 - 40	2%	Behoorlijk robuust, kwetsbare onderdelen	> €1000,-	10 jaar	Meteo stations
Laser Doppler	-	> 100	-	-	> 20.000,-	10 jaar	Zeer hoge snelheden
Pitotbuis	-	0 > 100	1%	Kop van de pitotbuis kan vervuilen, overigens zeer robuust, geen slijtage	€ 250,-	onbeperkt	Luchtkanalen, vliegtuigen
Druksensoren	SPD 1000 Sensirion testo 6344	indirect		Drukmeting is nauwkeurig, kWh meting minder, ventilatorrendement kan afwijken. Wel een robuust systeem	€ 100		

3.2.2 Kistentelling

Voor het detecteren van het aantal kisten in de rij voor de circulatieventilator zijn verschillende systemen mogelijk:

- Afstandsensoren per rij kisten
- Totaalbeeld van de celinhoud
- Scanbare/beschrijfbare codes per kist

De systemen hoeven niet heel precies te zijn, het tellen van het aantal kolommen is voldoende. Bij een maximale stapeling van 6 hoog x 10 diep zijn er maximaal 10 kolommen, waarbij de kolom het verst van de systeemwand uit minder dan 6 kisten kan bestaan. Dit heeft niet veel effect op het totale debiet, wel kan hierdoor de verdeling iets verschuiven ten gunste van de onderste lagen. Met lasersensoren, of met akoestische (ultrasone) sensoren kan de afstand van de celdeur tot de eerste kist in bv. de 3de laag gemeten worden. Deze afstand geeft aan hoeveel kolommen er voor de wand staan. Per rij is hiervoor een sensor nodig. De ultrasone afstandsensor meet minder ver dan de lasersensoren. Er is een enorme hoeveelheid afstandsensoren op de markt, zie:

<http://www.products4engineers.nl/sensoren-transmitters/afstandsensoren-lengtemeetsensoren/pid4696-afstandsensoren.html> .

De prijzen variëren van €20,- tot €2000,-. Voor de toepassing in een bewaarcel is een bereik van ongeveer 9 tot 13 meter ruim voldoende. De sensoren die op de markt zijn meten zeer precies (op enkele mm's tot cm's nauwkeurig), wat voor toepassing in een bewaarcel niet nodig is.

Om over een goedkope toepasbare, robuuste sensor te kunnen beschikken moet met de verschillende fabrikanten overlegd worden.

Een andere methode is via beeldherkenning: een camera (webcam) maakt vanaf een bij voorkeur hoge positie een frontale opname van de opstapeling. Dit beeld moet verwerkt worden. Door de perspectiefwerking zullen de meer naar achteren gelegen kisten kleiner afgebeeld worden. Hieruit kan bepaald worden op welke positie de kist zich bevindt. Om de kisten onderling en van de omgeving goed te kunnen onderscheiden moet de belichting tijdens de opname aangepast worden.

Met een Time Of Flight camera kunnen kisten gescand worden waardoor van alle kisten de positie berekend kan worden. Van een array van leds bv. 200 bij 200 wordt telkens één led kortstondig ingeschakeld (gepulst). De tijd die het licht nodig heeft om te reflecteren is een maat voor de afstand. Deze afstanden worden in een matrix in dit geval van 200 x 200 opgeslagen. Mbv. deze matrix kunnen de posities van de kisten berekend worden. De firma OCTUM heeft ervaring met het controleren van de vulling van dozen, voor de toepassing bij kuubskisten moet dit natuurlijk opgeschaald worden, <http://www.octum.de/index.php?id=312>. De firma SICK heeft veel producten op het gebied van laser en time of flight metingen (www.sick.nl).

Een geheel andere benadering is het toepassen van Barcodes, QR-codes, Bokodes of RFID tags aan de kuubskist. Bij het in- of uitgaan van een kist in de bewaarcel kan door een scanner gelezen en geschreven worden welke kist waar staat. Dit zou geheel of gedeeltelijk geautomatiseerd kunnen worden waarmee moderne magazijntechnologie wordt toegepast en het systeem geïntegreerd wordt in de bedrijfsadministratie. Een enkel bedrijf past vergelijkbare technologie al toe. Op deze wijze wordt de klimaatcomputer geïnformeerd over het aantal kisten in een bepaalde rij voor de systeemwand.



RFID tags zijn transponders die in de kuubskisten gemonteerd kunnen worden en de functionaliteit van intelligente barcodes hebben. RFID tags werken globaal in 3 verschillende frequentiegebieden met elk specifieke voor- en nadelen, zoals storingsgevoeligheid, meetbereik, kostprijs.

Van http://nl.wikipedia.org/wiki/Radio_frequency_identification: RFID tags “kunnen actief, semi-actief/semi-passief of passief zijn. Actieve RFID-tags hebben een batterij en kunnen worden gelezen en geschreven met

een "remote transceiver" ook wel "reader" genoemd die met een antenne radiogolven zendt en ontvangt. Ze kunnen een signaal over een grotere afstand (van zo'n 100 meter tot zelfs een paar kilometer) uitzenden; ze zenden meestal met een interval hun ID uit. Semi-actieve tags hebben ook een batterij maar zenden alleen als antwoord op een ontvangen signaal. Passieve tags hebben geen eigen energiebron: ze benutten het elektromagnetische veld van een lezer om een stroom te induceren in een spoel, waarmee de chip wordt gevoed. Hierdoor gaat het antwoordsignaal niet over een grote afstand (van enkele centimeters tot ongeveer vijf meter)." De firma TURCK heeft veel ervaring met RFID systemen in industriële omgeving (www.turck.com en info@turck.nl).

De kosten van een dergelijk systeem, inclusief integratie in de klimaatcomputer, zijn nog niet bekend. De baten gaan echter verder dan alleen het optimaliseren van het bewaarklimaat en het minimaliseren van het energieverbruik.

3.3 Regelsystemen

De gunstigste scenario's om een regelsysteem voor te ontwerpen zijn scenario 1c, geschikt voor de bewaring van alle bolgewassen, en de scenario's 2 en 3, alleen geschikt voor tulp.

Voor scenario 1c is een debietmeter bij de inlaat van de systeemventilator plus een kistentelsysteem noodzakelijk. Door de lage kosten en de robuustheid zijn de meest geschikte debietmeters die gebaseerd op thermische geleiding (bv. MW22 Mierij Meteo en Testo 0628), mogelijk ook de Pitotbuis. Het eenvoudigste kistentelsysteem is op basis van een afstands sensor. De goedkoopste toepassing zal in overleg met fabrikanten bepaald moeten worden en is vml. maatwerk.

Om de regeling optimaal te laten werken moeten de bewaarcellen eerst ingeregeld worden: de celventilatie bij 100% klepstand moet bepaald worden (dit is vaak ruim boven de norm van 100 m³/uur per m³ bollen) en de gemeten luchtsnelheid (m/s) bij de inlaat van de systeemventilator moet omgerekend kunnen worden naar totaal debiet (m³/uur).

Vervolgens moet ingesteld worden wat het maximale gemiddelde circulatiedebiet bij 100% toeren zou moeten zijn: vaak is het gemiddelde circulatiedebiet ook ruim boven de norm van 500 m³/uur om de ongelijke luchtverdeling over lagen en per laag te compenseren.

De software voor de regeling moet als het totaal debiet toeneemt (door het vervangen van bv. kisten met ongepelde bollen door kisten met leverbaar) terugtoeren tot het gemiddelde debiet weer gelijk is aan het ingestelde debiet. Worden kisten weggereden dan kan (automatisch) precies worden teruggetoerd tot het totale debiet gedeeld door het aantal kisten weer op de ingestelde waarde uitkomt.

Door het 3^{de}-machtsverband tussen toerental en energieverbruik is de invloed van de meetnauwkeurigheid op het energieverbruik groot. Aan de meetnauwkeurigheid en reproduceerbaarheid moeten dus hoge eisen gesteld worden. Een instituut (evt. leverancier) moet periodiek de sensoren kalibreren en een certificaat hierbij afgeven. In de glastuinbouw is de relatie meetnauwkeurigheid en energieverbruik bekend en wordt een begin gemaakt met het opstellen van meet- en kalibratieprotocollen. Dit gebeurt meestal in samenwerking met de leverancier maar dit kan ook een onafhankelijke partij zijn. WUR Glastuinbouw is bezig een dergelijke service op te zetten.

Het alternatief om het aantal kisten voor de wand via RFID tags, of een andere moderne magazijntechnologie te bepalen is zeker de moeite waard als dit systeem in de bedrijfsadministratie een rol speelt. Het administratieve systeem levert dan als "bijproduct" aan de klimaatcomputer het aantal kisten voor de wand/ventilator. Vooral grote bedrijven, en bedrijven gespecialiseerd in bewaring/preparatie kunnen hier het voortouw nemen. Softwarematig moeten dan twee computersystemen deels geïntegreerd worden.

Voor scenario 2, alleen geschikt voor nagenoeg volle bewaarcellen, is voor bedrijven met tulp en ethyleenanalysers alleen de ontwikkeling van software nodig. De kosten hiervan kunnen gedeeld worden

door het aantal ventilatoren op het bedrijf. Naast de gemeten ethyleenconcentraties en klepstanden is ook ΔT een noodzakelijke parameter voor het bepalen van de frequentie-instelling van de systeemventilator. Vermoedelijk is een gedempt zoekend systeem het betrouwbaarst en softwarematig het eenvoudigst te implementeren: De huidige regeling zoekt op basis van het gemeten ethyleengehalte naar een klepstand waarbij dit gehalte onder de ingestelde waarde van de ethyleengrens (100 ppb) blijft. Vervolgens kan de klimaatcomputer op basis van ΔT het bijbehorende energieverbruik voor ventilatie berekenen en het energieverbruik van de op 100% toeren draaiende systeemventilator. Afhankelijk van de klepstand, die niet hoger dan 100% kan zijn (en indirect een maat is voor het gemiddelde percentage zure bollen) kan de klimaatcomputer de ventilatie stapsgewijs opvoeren. Dit resulteert in een lager ethyleengehalte van de cellucht en op basis van de formules op pg. 14 kan de computer via de frequentieregelaar de circulatieventilator terugtoeren. Vervolgens kan de som van het energieverbruik voor ventilatie en circulatie berekend worden. Hierna kan de ventilatie weer een stapje opgevoerd worden en wordt het proces herhaald tot het energieverbruik niet meer afneemt. Neemt ΔT daarna toe ('s nachts) dan moet de ventilatie weer iets teruggetoerd worden. De verwachte ethyleenproductie (of het percentage zure bollen) in de kist met het hoogste percentage zure bollen kan door de teler ingesteld worden. Voldoende demping (actie op basis van gemiddelde waarden van 1-3 uur of meer terug) voorkomt heftige klepbewegingen. In de loop van het bewaarperiode, wanneer de ethyleenproductie afneemt wordt het circulatiedebiet dan automatisch ook verlaagd.

Scenario 3 is een combinatie van scenario 1c en scenario 2.

Een draadloos regelsysteem, zie bijlage 2, is ook mogelijk, maar is alleen noodzakelijk als per kist gemeten zou moeten worden en heeft vooral beperkingen door stroomvoorziening van de sensoren.

Kosten voor de bewaring gedurende 120 dagen bij Scenario 0a/b en de besparingen op energie van de regelsystemen bij Scenario's 1b, 1c en 3, en de investeringen voor deze regelsystemen (voor een deel onbekend en/of indicatief) zijn samengevat in tabel 13.

Tabel 13: Kosten, besparingen en investeringen per ventilator/60 kisten voor regelsystemen, per Scenario.

		kWh		gas		kWh + gas	
kosten bij Scenario 0							
per kist		€ 14		€ 11		€ 25	
per ventilator/60 kisten		€ 864		€ 665		€ 1.529	
besparingen per ventilator (60 kisten)*							
Scenario		1b		1c		3 tov. 0b	
						totaal	
		%	€	%	€	%	€
celbezetting	100%	0%	0	0	0	0	23% 352
	90%	23%	199	10%	66	266	27% 420
	80%	42%	366	20%	133	499	32% 485
	70%	58%	503	30%	199	702	37% 565
investeringen per ventilator							
debietmeter	1			< 500 €			
kistenteller	1			< 250 €			
software	1/(aantal cellen x ventilatoren)			?			
installatie + bekabeling + onderhoud				?			

* besparingen op elektra agv. aanpassing van het circulatiedebiet aan kistinhoud niet meegenomen

De jaarlijkse besparingen zijn hoog en de verwachte investeringen laag (het aanbod op de markt voor de verschillende sensoren is dermate hoog dat concurrentie op deze voor de fabrikanten nieuwe markt op korte termijn vanzelf tot lage realistische prijzen zal leiden). De verwachte terugverdientijden zijn daarom kort (binnen enkele jaren).

4 Conclusies en Aanbevelingen

Conclusies:

De modelmatig doorberekende scenario's voor sensor- / computergestuurde circulatie laten zien dat ook de circulatie aan de behoefte aangepast kan worden. Door het 3^{de}-machtsverband tussen toerental en energieverbruik kan daardoor veel energie bespaard worden.

Het breedst toepasbare scenario (1c) is tegelijkertijd ook het meest simpele: Met afstandssensoren kan het aantal kisten voor een circulatieventilator bepaald worden en met luchtsnelheidssensoren kan tegelijkertijd het debiet van die ventilator bepaald worden. Wanneer door een grotere bolmaat, minder gevulde kisten of door het weghalen van kisten het gemiddelde debiet per kist toeneemt kan het regelsysteem de ventilator automatisch terugtoeren zodat het debiet weer op een vooraf ingesteld niveau uit komt. Hiermee kan bij het weghalen van 2 – 3 kolommen kisten al ruim 50% op elektra bespaard worden. Met ditzelfde systeem kan ook de ventilatie van de bewaarcel aan het aantal kisten aangepast worden, zodat ook het ventilatiedebiet per kist constant blijft. Op gas wordt dan ook nog eens 20 – 30 % bespaard. Dit systeem is geschikt voor alle bolgewassen, zou direct op 43% van het areaal toegepast kunnen worden en bespaart dan op sectorniveau rond de 3 miljoen €/jaar.

Scenario's 2 en 3 zijn alleen van toepassing bij de bewaring van tulpenbollen. Deze scenario's zijn direct toepasbaar op de 13% van het areaal waarvan de bollen bewaard worden in cellen met een ethyleenanalyser en frequentieregelaars, en waarvan de klimaatcomputer de ventilatie stuurt.

Voor Scenario 2 is alleen aangepaste software voor de klimaatcomputer nodig. De energiebesparingen met dit scenario zijn afhankelijk van ΔT en van de ethyleenproductie door zure bollen. Bij een gemiddelde $\Delta T = 4$ °C kan bij voldoende ventilatiecapaciteit bij 5% zure bollen al 23% op energie bespaard worden (t.o.v. het sturen van alleen de ventilatie op de ethyleengrens van 100 ppb) door iets meer te ventileren waardoor er fors minder gecirculeerd hoeft te worden. Bij gemiddeld 1% zure bollen in de cel wordt dan op gas + elektra 63% bespaard terwijl het bewaarklimaat ook in een kist met 5% zure bollen optimaal is. Uitgangspunt hierbij is dat de geïnstalleerde ventilatiecapaciteit voldoende is voor 100 – 125 m³ lucht/uur per m³ bollen en de geïnstalleerde circulatiecapaciteit voldoende voor gemiddeld 500 m³/uur. Scenario 2 is echter niet geschikt voor het aanpassen van de circulatie aan het weghalen van kisten, of een andere kistinhoud.

Scenario 3 combineert scenario 2 met scenario 1c een realiseert wel het aanpassen van de circulatie aan het weghalen van kisten en aan een andere kistinhoud. De energiebesparingen zijn dan nog veel groter dan bij Scenario 2.

Er zijn een groot aantal geschikte sensoren op de markt voor directe en indirecte debietmeting en kistentelling. Goedkoop en robuust voor debietmeting zijn de sensoren gebaseerd op thermische geleiding (bv. MW22 Mierij Meteo en Testo 0628), en mogelijk ook de Pitotbuis. Het eenvoudigste kistentelsysteem is op basis van een afstandssensor. De goedkoopste toepassing zal in overleg met fabrikanten bepaald moeten worden en is vml. maatwerk.

De koppeling aan een digitaal administratief magazijnsysteem is een zeer interessant alternatief voor de afstandssensor.

De verwachte investeringen voor computergestuurde circulatie zijn relatief laag en de mogelijke energiebesparingen zijn hoog. De terugverdientijden zijn naar verwachting kort (binnen enkele jaren). Ook de terugverdientijd van de ethyleenanalyser wordt met computergestuurde circulatie (scenario 2) verkort.

Aanbevelingen:

Voor fase 2 van dit project is het aanbevolen om i.s.m. de leveranciers van klimaatcomputers de ontwikkeling van de software voor scenario 2 op te starten. Deze software kan dan getest/gemonitord worden in het project State-of-the-Art bewaren van tulpenbollen.

Daarnaast is het voor het realiseren van de Scenario's 1c en 3 noodzakelijk om de fabrikanten/leveranciers van de diverse sensoren te benaderen om te participeren in testtrajecten met geïnteresseerde bollentelers. Ook voor deze toepassingen moet de klimaatcomputer uitgerust zijn met geschikte software.

Een derde aanbeveling is om na te gaan welke teelt- en/of preparatiebedrijven al moderne magazijn technologie toepassen. Met deze bedrijven zou zonder afstandssensoren Scenario 1c of Scenario 3 getest kunnen worden. Ook hiervoor zijn softwareaanpassingen en integratie van systemen nodig.

Een laatste aanbeveling is om het nano-technologische alternatief voor ethyleenmeting verder uit te werken.

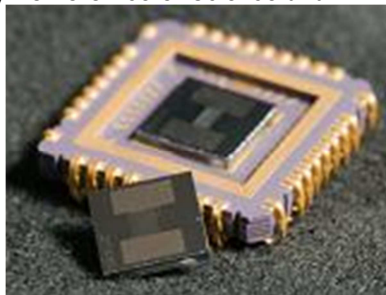
Bijlage 1: Alternatieve nanotechnologie voor ethyleenmeting?

Owlstone Ion Mobility Spectrometer on a Microchip

Trace molecules can be telltale signs of explosives in a briefcase or disease-revealing proteins in blood. Now, researchers at PNNL and Owlstone Nanotech in Cambridge, England, have dramatically improved the ability to detect and identify such molecules. Ion Mobility Spectrometer on a Microchip overcomes limitations of previous instruments by shrinking a key component — a channel through which such molecules must travel.

The dime-sized microchip is based on Field Asymmetric waveform Ion Mobility Spectrometry. Also called FAIMS, the method uses strong versus weak electric fields to separate electrically charged atoms or molecules called ions as they zoom through an instrument. In previous FAIMS systems, the distance ions raced ranged from 15 to 55 millimeters — even so, they took too long for the desired performance. "We needed to shorten the racetrack," said PNNL chemist Alex Shvartsburg.

But a shorter racetrack requires more intense electric fields to separate the pack of ions. So the team developed a FAIMS microchip with 0.3 millimeter-long channels that were only 35 micrometers wide. The short, narrow channels allow ion separation 100 to 10,000 times faster than previous instruments. Other design features improve the instrument's ability to measure both abundant and rare compounds in the same sample. Because the tiny FAIMS system was destined for use with mass spectrometry, the team then integrated and optimized the microchip with mass spectrometers at DOE's Environmental Molecular Sciences Laboratory at PNNL, as well as demonstrated how the new system can be used. The project was funded by the National Institutes of Health, DOE's Office of Science and PNNL.



What is the Owlstone detector?

The Owlstone detector is a revolutionary button-sized device that can be programmed to detect a wide range of airborne chemical agents that may be present in extremely small quantities.

The detector is manufactured exclusively by Owlstone and made available on an OEM basis to other third-party application developers. These developers, in turn, integrate the detector into their own chemical sensing products and solutions.

There are thousands of applications - across industries from security and defense to automotive and healthcare - that depend on the rapid, accurate detection and measurement of chemical compounds.

What benefits does the Owlstone detector offer over other sensing technologies?

Using leading-edge nanofabrication techniques, Owlstone has created a complete chemical detection system a hundred times smaller and a thousand times cheaper than other currently available devices.

Compared with other current ion mobility spectrometry (IMS) sensing technologies, Owlstone offers a unique combination of benefits including

- **Size and Weight** - The Owlstone sensor is fabricated on a single chip with linear dimensions of just under a centimeter.

- **Reliability** - The Owlstone sensor is a solid state device with no moving parts. It's immune to the effects of mechanical vibration or sudden physical shocks - making it ideal to cope with the rigors of real-world environments from airports and battlefields to factory floors.
- **Sensitivity** - The sensor can typically detect chemical agents in concentrations as low as a few parts per billion.
- **Response Speed** - The extremely small size of the sensor means that it can respond to the presence of chemical agents far quicker than larger diffusion-type detectors.
- **Low Power Consumption** - Operating at low voltages, the detector's solid state design ensures that it consumes far less electrical power than conventional ion mobility spectrometry (IMS) sensors.
- **Reduced False Positives** - The sensor's ability to discriminate accurately between different chemical compounds means that anomalous 'false positive' alerts are minimized. Versatility: it's easy to adapt the sensor's ability to detect other threats through changes to on-board software and signal processing alone. The same core technology can therefore be applied to meet application needs across a wide range of market areas and industries.
- **Cost of Manufacture** - Each sensor can be fabricated at a cost of less than five US dollars - a fraction of the cost of other detector technologies. This makes Owlstone detector technology particularly attractive for high-volume consumer applications, ranging from personal medical care and monitoring to smoke detection.

How does the Owlstone detector work?

The solid-state detector is based on patented innovations that allow a complete analytical sensor to be built on just two silicon chips - one for the sensor itself, and the other for its associated electronics, together with an ionization source. With this patented technology - known as Field Asymmetric Ion Mass Spectroscopy (FAIMS) - gas is ionized and passed through the sensing chip. By programming the device with suitable drive signals, individual gases can be detected quickly in very small quantities. The way the sensor is built means that the cost can be very low for the performance achieved.

How is the detector manufactured?

The detector is fabricated on a microscopic scale, using lithographic techniques where the sensor components are etched on a silicon substrate (MEMS), much like the manufacture of a microprocessor. This offers a number of distinct advantages over other chemical sensor technologies - notably size, cost and ease of mass production - as well as the sensor's ability to be programmed for a particular application.

What applications can the Owlstone detector be used for?

The range of applications for Owlstone chemical sensing technology is virtually limitless. Any application that depends on the rapid, cost-effective detection of organic and inorganic chemical agents - whether airborne or in solution - can potentially benefit from Owlstone's advanced, patented technology. Initially, Owlstone technology is being targeted at [four/five] key application areas, namely Defense and Security, Medical and Diagnostic, Industrial, Automotive, Environmental and Consumer.

Can the core technology in the Owlstone detector be adapted to detect the presence of any chemical compound?

The detector's drive signals and signal processing can be 'fine tuned' to recognize the unique signature of a virtually any gas - or range of gases - whether airborne or dissolved in water or other fluids. This makes the detector exceptionally versatile, as well as making it even more cost-effective to manufacture the device in large quantities to meet a wide range of application requirements.

Can the detector detect multiple threats at the same time?

Yes. The detector generates a continuous 'spectrum' of information about any chemical agents in its presence. The unique molecular signatures of several chemical compounds can thus be identified simultaneously, making the sensor even more versatile in a wide range of defense/security, medical and industrial applications.

Will the detector's ability be undermined by the development of new, artificially synthesized chemical agents that can't be detected?

No. Any chemical compound - whether naturally occurring or man made - bears a characteristic molecular 'fingerprint'. This individual signature can always be detected using appropriate sensor drive signals and signal processing.

Where can I get hold of an Owlstone sensor? And what's the timeline for availability of commercial products and applications based on the Owlstone detector?

The Owlstone detector is available to OEMs (Original Equipment Manufacturers) who integrate the device into their own products, systems and applications.

Owlstone is interested in discussing requirements further with OEMs to implement laboratory and field tests with our portable test platform. A second generation test platform will be available in October, allowing partner OEMs and systems integrators to develop their own applications based on the Owlstone detector'. It is anticipated that the first wave of commercial products will be available during 2006. Potential development partners are invited to contact Owlstone now.

When was the company established?

The research began at the University of Cambridge in 2001 by three engineering researchers; Andrew Koehl, David Ruiz-Alonso, Billy Boyle. They subsequently spun out in early 2004.

Why is this technology so relevant now?

Existing technologies cannot meet the challenge of chemical and explosive detection in transport networks, government buildings, public spaces, financial institutions etc. The reality of the threat against such targets demands a generational leap in technology capability and a dramatic reduction in cost. Recent atrocities graphically illustrate security gaps, Owlstone aims to use its technology to provide safety where it is needed most.

What is FAIMS?

The Owlstone detector implements an analytic technique called high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry (FAIMS). The approach sorts compounds according to how their charged forms move through a gas when subjected to electric fields. Each substance has its own characteristic smell, or fingerprint. The Owlstone detector acts as a filter; compounds of interest are filtered and detected, while interferants are screened out.

How would these sensors be deployed, in a train station for example?

A small and cheap detector opens up a range of deployment scenarios, from very small disposable sensor applications to rugged fixed installations in oil rigs.

The cost reduction in wireless technology, coupled with the power of the Owlstone detection technology, enables applications previously unfeasible or prohibitively expensive. For example, arrays of sensors could

be dropped from military jets onto a battlefield to create an intelligent detection network capable of identifying and tracking threats.

The small form factor of the sensor would make it possible to connect directly to a mobile phone, which could provide computing power for a non-invasive diagnostic tool to diagnose disease and illness by detecting chemical markers on the breath.

The deployment and interface possibilities are endless and 'working with integrator partners' Owlstone will address the needs of multiple high value markets which demand cutting edge detection solutions.

What is the relationship with the University of Cambridge?

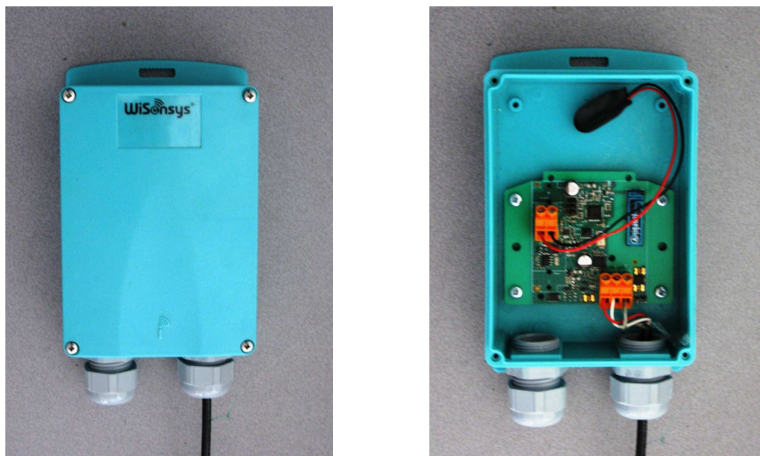
Owlstone has no formal linkage to the university but still has a very close relationship with many world class personnel located there.

Read more: [FAIMS Field Asymmetric Ion Mobility Spectrometer](http://www.owlstonenanotech.com/site.php?technology#ixzz0x2VHUCjw)
<http://www.owlstonenanotech.com/site.php?technology#ixzz0x2VHUCjw>

Read more: [Owlstone Nanotech - Frequently Asked Questions](http://www.owlstonenanotech.com/site.php?faq#how#ixzz0x2V0yNd3)
<http://www.owlstonenanotech.com/site.php?faq#how#ixzz0x2V0yNd3>

Bijlage 2: Draadloze systemen

Sensoren hebben een elektrische voeding nodig om te kunnen functioneren, bv. de hetedraad sensor. De datalogger of de klimaatcomputer, waaraan de sensoren gekoppeld zijn, moet geschikt zijn om de stroom voor de sensor te leveren. Dit is geen probleem bij een sensor die via een kabel vast is aangesloten op datalogger of klimaatcomputer. Voor een draadloze verbinding van de sensoren via meetzenders naar een klimaatcomputer, telkens één sensor in een rij kisten voor de droogwand, is hieronder als voorbeeld een oplossing getoond met de draadloze combinatie meetzender/ontvanger van het merk Wisensys, figuur 1. Draadloze systemen behoeven geen bekabeling en dit kan de toepassingsmogelijkheden vergroten. Bij gebruik van een sensor op batterij moet de sensor worden ingeschakeld door de meetzender, gedurende een vaste periode worden opgewarmd, om vervolgens na de meting weer door de meetzender te worden uitgeschakeld.



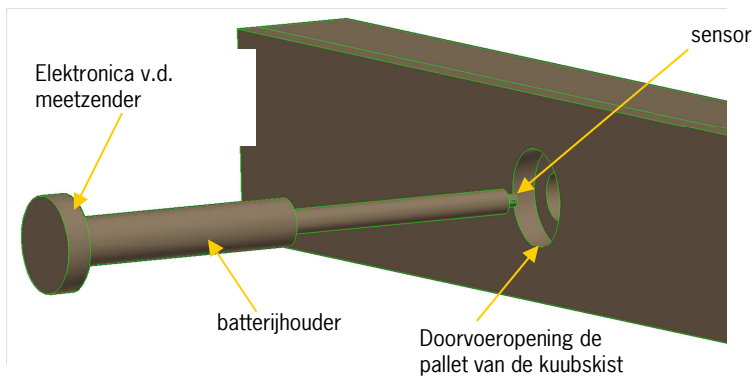
Figuur 1: De draadloze meetzender van Wisensys

Om alle meetzenders in de verschillende rijen te kunnen uitlezen en doorverbinden met de klimaatcomputer is er één basisstation nodig. De prijs van de meetzender ligt in de orde van €300,- en van het basisstation €500,-. Alvorens het Wisensys systeem in te zetten met één basisstation bij meerdere bewaarcellen moet nagegaan worden wat het bereik van de toepassing is. In het open veld kunnen afstanden tot 200m overbrugd worden maar dit is fors minder in een omgeving met staalconstructies (eventueel plaatstalen wanden) van bewaarcellen.

De behuizing van de meetzender kan aangepast worden aan de benodigde accu. De accu afmeting (fysieke volume en capaciteit in Ah) wordt bepaald door het aantal zend/ontvang verbindingen per tijdseenheid, de tijdsduur x stroomgebruik van het meetinterval en de opwarmtijd x opwarmstroom voor bv. de hittedraad per meting.

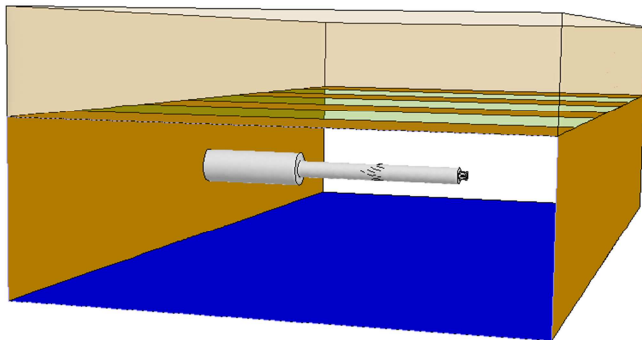
De sensor weergegeven in figuur 7, pg.20, neemt bij een luchtsnelheid van 2 m/s een stroom op van 70mA bij een spanning van 10V, de opwarmtijd is 4 sec en de meettijd 2s. De totale inschakeltijd is 6s. Bij een meetinterval van 180 s is de gemiddelde stroom $6/180 * 70 = 2,3$ mA. Gesteld dat de sensor 8 weken moet kunnen meten ($8 * 7 * 24 = 1344$ uur) op 1 batterijlading dan moet de accucapaciteit $1344 * 2,3 = 3135$ mAh bedragen, met een praktische waarde van 4500 mAh kan meer dan 10 weken gemeten worden.

In Figuur 2 is een schets gemaakt van een ontwerp van een meetzender, batterijhouder en een sensor. De complete meetzender kan door een opening in de palletruimte van een kuubskist geschoven worden en sluit de opening vlak af waardoor de meetzender goed beschermd zit. Dit zou een optie kunnen zijn voor de minst beluchte laag in een eenlaagssysteem.



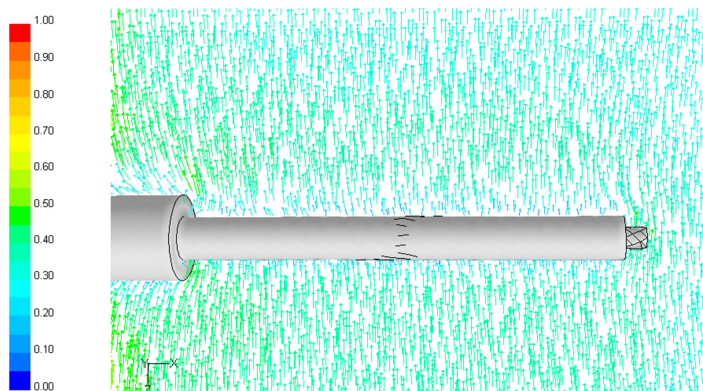
Figuur 2: Schets van een draadloos meetstation in de voet van een bewaarkrat.

Door de sensor op een pijp te monteren kan deze op elk willekeurige positie in het palletkanaal van de kuubskist geplaatst worden. Zodra de kist mbv. een heftruck opgestapeld is kan de meetzender vanaf de zijkant in de voet geschoven worden, figuur 3. Alvorens de kist opnieuw te verplaatsen moet de meetzender eerst verwijderd worden om beschadiging te voorkomen. De kist kan van een waarschuwingssticker voorzien worden.



Figuur 3: Plaatsing van de meetzender binnen in het palletkanaal.

Om te zien hoe de luchtstroom in de voet van een bewaarkist wordt beïnvloed door de complete meetzender is hiervan een berekening gemaakt met Computational Fluid Dynamics modellen. Door de sensor op een pijp van bv. 18 mm te plaatsen wordt de luchtstroom maar minimaal beïnvloed, figuur 4.



Figuur 4: De invloed van de meetzender op de luchtstroom (CFD modellering)

