Deze serie artikelen over de groeifactor CO_2 kon slechts worden gerealiseerd door de medewerking van een groot aantal personen. Aan het tot stand komen van deze brochure hebben de volgende personen een belangrijk aandeel gehad door een of meer bijdragen te leveren:

J. van Harten, Consulentschap Tiel
Dr.Ir. P. de Lint, Proefstation Naaldwijk
Ing. E. Moerman, Consulentschap Naaldwijk
Ir.E. Nederhoff, Proefstation Naaldwijk
Ing. J. Nienhuis, Proefstation Naaldwijk
Ing. J. van Uffelen, Proefstation Naaldwijk
Ing. P. Vermeulen, Proefstation Naaldwijk
Ing. A. Zandbelt, CAD-BAT Wageningen

Redactionele bijdrage:
J. Mostert, Proefstation Naaldwijk
Medewerking fotografie:
P. Krins, Rotterdam.

Redactie en lay-out werden gerealiseerd door de redactie van het weekblad Groenten en Fruit. De produktie van een brochure vraagt altijd weer een extra inspanning. Daarom willen we de personen die hebben meegewerkt aan het tot stand komen van deze uitgave hartelijk dank zeggen.

L.G. VAN UFFELEN
Voorlichtingscoordinator
Consulentschap in Algemene Dienst voor de Glasgroenteteelt, Naaldwijk

Deze brochure is uitgegeven door het Proefstation voor tuinbouw onder Glas in Naaldwijk. U kunt deze en andere brochures bestellen door het bedrag dat op de omslag is vermeld over te maken op postbanknummer 293110, ten name van
Proefstation Naaldwijk, Postbus 8, 2670 AA Naaldwijk. Hetzelfde is mogelijk via RABO-bank Midden Westland nr. 34 36 08 006 te Naaldwijk.

ISN 190891 H

CO_2 in de kas

Proefstation voor Tuinbouw onder Glas te Naaldwijk
Consulentschappen voor de tuinbouw

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0935 5229

CO_2 in de kas

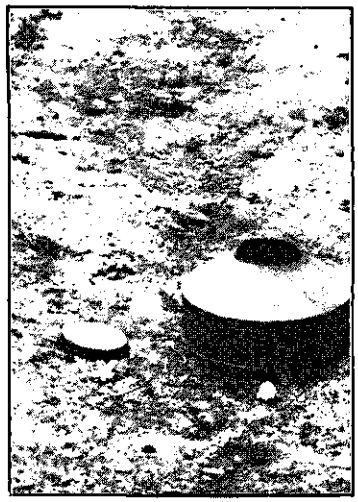
INHOUD

Inleiding 3
CO_2 en plantengroei 4
Effect van CO_2 op groei en produktie 8
CO_2 bij de opkweek 13
Samenstelling kaslucht 14

CO_2 doseren:
Wanneer, hoelang, hoeveel? 16
Berekenen CO_2-verbruik en efficiëntie 19
Economisch verantwoord CO_2 doseren 22
Bronnen voor CO_2 25
Centraal CO_2 doseren 28
Installaties voor doseren CO_2 30
Verdeling van CO_2 32
Het meten van de CO_2-concentratie 34
Onderhoud en ijken noodzakelijk 38
Een goede CO-bewaking voorkomt calamiteiten 40
Automatisch regelen CO_2-dosering 42
Opslag van overtollige warmte 44
Regeling van warmte-opslag 47
Capaciteit warmte-opsslag moet bij bedrijf passen 48
Kosten en baten CO_2-doseren 50
Wat kost het aanhouden van 340, 400 of 500 dpm? 53
Extra produkt bij 340, 400 en 500 dpm 55

Inleiding

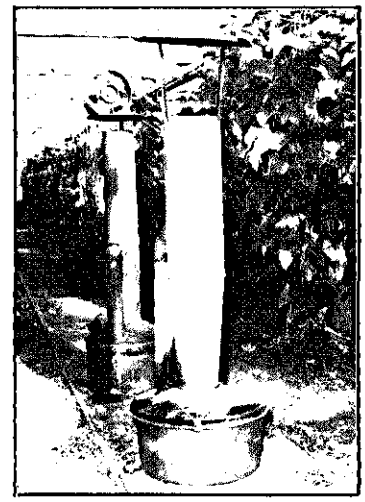
De waarde van koolzuurdosering is sinds een aantal jaren algemeen bekend in de Nederlandse glastuinbouw. Met de verbetering van de mogelijkheden om CO_2 te doseren, neemt ook de behoefte toe aan meer plantfysiologische, teeltkundige en technische kennis bij de tuinders. Na de vorige uitgave van de CO_2-brochure heeft het onderzoek zodanig veel opgeleverd dat het goed is om alle kennis weer eens te verzamelen. Daarom worden in deze brochure de verschillende aspecten van het CO_2 doseren belicht. Behalve de kennis die in het verleden werd opgedaan, zijn in deze brochure vooral de onderzoeksresultaten van de laatste jaren verwerkt. Deze brochure is in de tweede helft van 1987 gepubliceerd in het weekblad Groenten en Fruit. Het leek ons van belang voor de vele geïnteresseerden ook de mogelijkheid te bieden een gebundelde versie aan te schaffen.



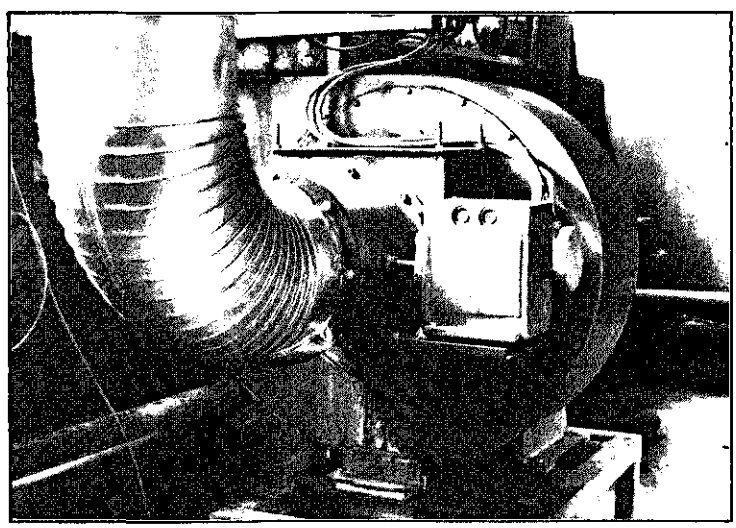
Een spiritusbrandertje voor de CO_2-voorziening in de jaren '30/32

CO_2 doseren:

In dertiger jaren bekend
In zeventiger jaren toegepast
In tachtiger jaren geoptimaliseerd



Hylo's voor CO_2-dosering; „ploffers"



Een moderne CO_2-unit.

Koolzuurgas is van nature aanwezig in de lucht. Planten kunnen niet zonder CO_2 en nemen het vanuit de lucht op. Koolzuurgas is een van de bouwstenen voor de groei van planten. In het onderzoek is al vroeg onderkend dat een verhoging van het CO_2-gehalte in de ruimte een betere opname teweeg brengt, wat resulteert in hogere produkties bij veel gewassen.
Al voor 1930 werden proeven genomen met onder andere gewassen als komkommer, bloemkool, sla, spinazie en tomaten. Later volgden ook andere gewassen. Daarbij gingen de gedachten tevens uit naar mogelijke verschillen in resultaat tussen dosering in de ochtenduren en in de namiddag.

In de loop der jaren zijn voor de produktie van CO_2 diverse bronnen beproefd. Briketten, (beuken)houtskool, spiritus en rookgassen uit met cokes gestookte installaties werden vergeleken. Deze laatste werden eerst gezuiverd. CO_2 en rookgassen van petroleumbranders (ploffers, kanonnen) en in een later stadium van de grote gasgestookte verwarmingsinstallaties werden daaraan toegevoegd.

Aanvankelijk waren de resultaten kennelijk onvoldoende voor de praktijk; er vond althans weinig toepassing plaats. Mogelijk was het rendement te gering, omdat ook al veel CO_2 vrijkwam uit de grote hoeveelheden stalmest die destijds werden gebruikt. Vooral in de komkommerteelt, waarbij veel staalgrond en later broeiveuren werden gebruikt, kwam veel CO_2 vrij. Hierdoor heeft het onderzoek naar CO_2 een groot aantal jaren op non-actief gestaan.
In de zeventiger jaren is hier verandering in gekomen. Met het afnemende gebruik van organisch materiaal en later de overgang naar de teelt in steenwol, waarbij ook de grond nog eens met plastic folie wordt afgedekt, is de noodzaak van het doseren van CO_2 extra sterk naar voren gekomen. Daarbij gaat het niet alleen om het vroege voorjaar, maar zeker ook om de zomerperiode. Juist dan hebben de gewassen de grootste behoefte aan CO_2. Bovendien hebben deze gewassen juist de mogelijkheden om met extra CO_2 tot hogere produkties te komen. Door verbetering van apparatuur nemen de mogelijkheden van beheersing van het CO_2-niveau toe.
De laatste jaren is op veel plaatsen in de wereld onderzoek gedaan naar de effecten van CO_2 op allerlei gewassen. Daarnaast worden nu studies verricht om computermodellen te ontwikkelen waarmee het mogelijk wordt een economisch optimaal CO_2-niveau te berekenen. Later kunnen deze modellen dan worden ingebracht in de klimaatcomputers, om dit optimale gehalte ook te realiseren.

L.G. VAN UFFELEN
Voorlichtingscoördinator
CAD-G

CO_2 en plantengroei

Koolzuurgas, of kortweg koolzuur (CO_2), is eigenlijk de enige echte voedingsstof voor planten. Planten kunnen namelijk koolzuur en water (H_2O) samenvoegen tot suiker ($C_6H_{12}O_6$). Hierbij is lichtenergie nodig.

Suiker is de basisstof waar plant, mens en dier hun energie uit halen om te groeien, te leven en te werken. Alle levende wezens verademen suiker om aan de nodige energie te komen voor de levensfuncties. In het zogenaamde verademingsproces valt de suiker weer uiteen tot koolzuur en water waarbij de vastgelegde energie weer vrij komt. De plant maakt van suiker vaak zetmeel, wat voor de mens weer geldt als energie-rijk voedsel (brood, aardappelen). De plant hoeft geen meel of suiker te eten, want deze stoffen worden in de plant zelf gevormd uit licht, koolzuur en water.

Het vermogen om lichtenergie vast te leggen in chemische stoffen, zoals in suiker, is een heel bijzondere eigenschap die alleen planten bezitten. Mens en dier verademen, verteren en ontleden plantaardige, energie-rijke stoffen. Planten doen dat ook. Planten leven net als dieren door suiker te verteren. Maar dieren kunnen dat alleen doen na zich eerst goed gevoed te hebben met suikerachtige stoffen. Planten moeten zich eerst gevoed hebben met CO_2 en licht, waardoor beide groeifactoren zo belangrijk zijn. Een goed belichte plant is goed doorvoed. Hoe meer licht een plant krijgt, hoe krachtiger de groei is, maar daar hoort een goede CO_2-voorziening bij. **Meer licht en meer CO_2 geeft meer groei.**

Ademhaling

Ademhaling bij planten en dieren is de ontleding van suikers in koolzuur en water. Hierbij komt energie vrij. Ademhaling is eigenlijk een soort langzame verbranding met behulp van zuurstof. De energie die daarbij vrijkomt, is nodig om de levensprocessen op gang te houden. De volgende chemische vergelijking omschrijft wat er gebeurt:

$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$

Ofwel: Suiker + zuurstof → koolzuur + water

Bij mens en dier bestaan eigenlijk twee ademhalingsbegrippen. Wat wij bij mens en dier de ademhaling noemen, is in feite alleen maar lucht-uitwisseling door de longen. Wij moeten steeds zuurstof (O_2) inademen en koolzuur uitademen. In elke levende lichaams-cel vindt het „echte ademhalingsproces" plaats, namelijk de ontleding en omzetting van organische energie-rijke stoffen. In elke cel komt daardoor steeds wat CO_2 vrij en is er steeds zuurstof nodig. Bij mens en dier wordt via de longen en het bloed zuurstof naar alle cellen van ons lichaam gebracht. Daar wordt het gebruikt in het echte ademhalingsproces en vervolgens wordt de vrijkomende CO_2 weer via bloed en longen afgevoerd.

Planten hebben geen longen en bloed. Daarom moeten alle plantecellen zoveel mogelijk zelf in contact staan met de omringende lucht, want de zuurstof en het koolzuur moeten op „eigen kracht" hun weg zoeken naar en van de plantecellen. Planten zijn daarom noodgedwongen poreus van bouw. In alle plantedelen zitten tussen de cellen kleine luchtholten. Bij een „glazig" blad zijn de poreuze ruimten volgelopen met water. De cellen in zo'n plek krijgen daardoor onvoldoende zuurstof en zullen na enige tijd afsterven door verstikking. Ook wortels in te natte grond gaan dood door zuurstofgebrek, want de voor de levensfuncties nodige energie komt dan niet meer beschikbaar.

Fotosynthese

Planten zien kans de normale gang van het meest belangrijke levensproces, de ademhaling, om te keren. Planten ontleden niet alleen suiker, maar zijn ook in staat tot het maken van suiker. In groene plantedelen die worden belicht, wijst de pijl in de chemische vergelijking de andere kant op: Er is CO_2 (en water) nodig waaruit dan suiker en zuurstof ontstaan. Omdat de bij dit proces benodigde energie persé door licht moet worden geleverd, spreken wij van het fotosynthese-proces (foto betekent licht). Het resultaat van dit proces is dat CO_2 wordt opgenomen en vastgelegd in de bladeren. Daarom heet het proces ook wel CO_2-assimilatie (assimilatie betekent inbouw). De ademhaling heet daarom ook wel CO_2-dissimilatie (dissimilatie staat dan ook voor afbraak).

De chemische vergelijking van het fotosynthese-proces is als volgt:

$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$

Ofwel: koolzuur + water → suiker + zuurstof.

De suikers die in het fotosynthese-proces worden gevormd, worden op vier manieren gebruikt:

- Onderhouds-ademhaling: Verbranding van suikers om in leven te blijven (in alle organen).
- Groei-ademhaling: Aanmaak van andere plantaardige stoffen en tevens van „werk-energie".
- Structurele groei: Aanmaak van nieuw plantmateriaal.
- Reserve-vorming: Opslag van zetmeel en olie.

CO_2-vastlegging

Het begrip CO_2-vastlegging of CO_2-opname moet nauwkeurig worden omschreven om verwarring te voorkomen. Vastlegging is in elk geval altijd een „netto" getal. Een blad dat fotosynthetiseert (assimileert) ademt tegelijkertijd ook. Het leven van de cellen gaat ook tijdens de belichting gewoon door. Dus suiker aanmaak en suiker afbraak gebeuren tegelijkertijd en samen bepalen ze hoeveel suiker netto wordt aangemaakt. Deze netto-aanmaak wordt vastgelegd in de plant:

Vastlegging = fotosynthese – verademing.

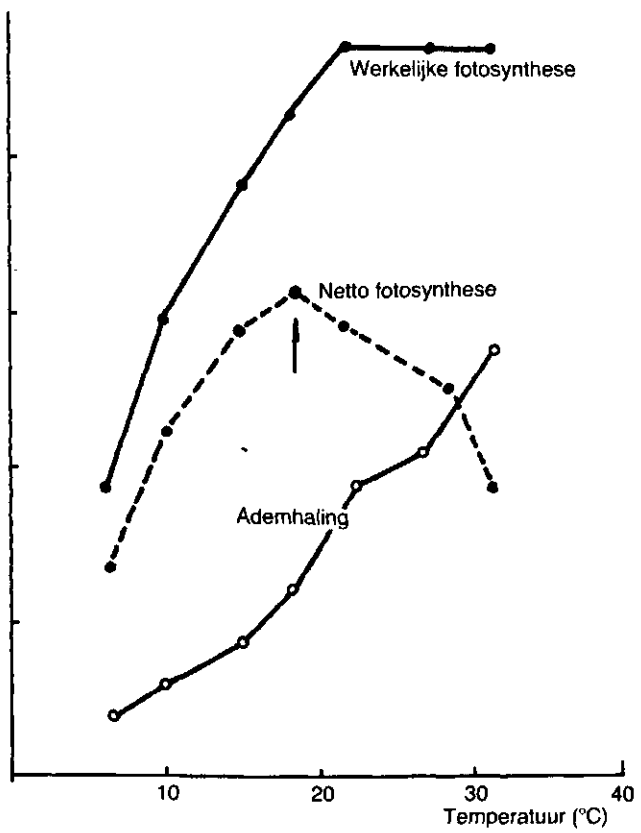
De vastlegging, of de drogestofproduktie, in een belicht blad wordt vaak bepaald als een CO_2-opname-snelheid, bijvoorbeeld mg CO_2 per cm^2 blad gedurende een uur. Dit is dus de netto CO_2-vastlegging per eenheid bladoppervlak gedurende een uur uitgaande van een bepaalde belichting, CO_2-concentratie en temperatuur. De werkelijke fotosynthese in zo'n stukje blad is dus nog iets groter dan de „netto" fotosynthese, de opname van CO_2 die in de meting kan worden vastgesteld. Dit is te zien in **figuur 1**. Vooral bij een hoge temperatuur kan het verschil tussen bruto en netto fotosynthese aanzienlijk zijn. Bij een hoge temperatuur wordt immers veel verademd. Wij merken het niet, want de CO_2 die in het blad vrijkomt door de ademhaling wordt meteen weer in de plant vastgelegd.

Voor de tuinder is eigenlijk een andere CO_2-vastleggingsmaat direct van belang, namelijk de vastlegging door een hele plant en niet alleen wat er in de bladeren gebeurt. De wortels, stengels, bladeren, bloemen en vruchten geven allemaal CO_2 af, maar alleen belichte bladeren nemen CO_2 op.

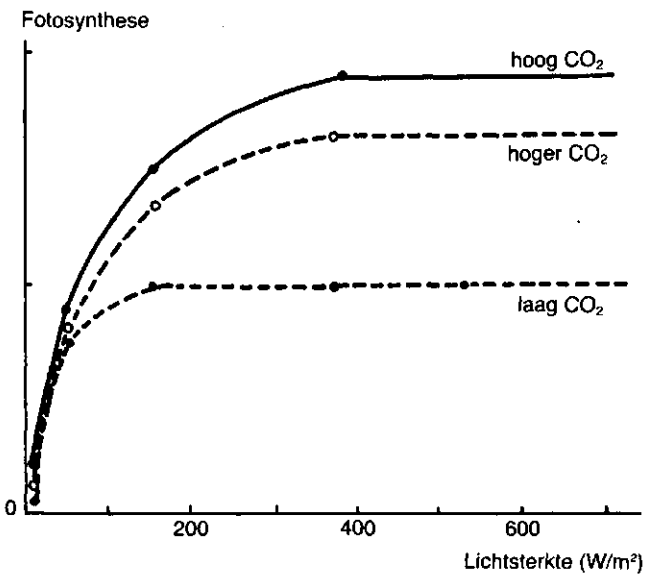
De CO_2-vastlegging in een plant is dus lager dan de opname door de bladeren. Hoe groter de levende plantemassa, des te groter de rol van de ademhaling en hoe kleiner de CO_2-vastlegging zal worden. Uit metingen aan hele planten wordt precies bekend hoeveel CO_2 uit de kasruimte verdwijnt, bijvoorbeeld uitgedrukt in gram CO_2 per m^2 per uur. Deze waarde en het ventilatie-verlies zijn nodig om te weten hoeveel CO_2 moet worden gedoseerd.

Er is nog een derde norm om de CO_2-vastlegging aan te geven. Naast de CO_2-opname tijdens de uren dat het licht is, is het van veel belang te weten wat er nu

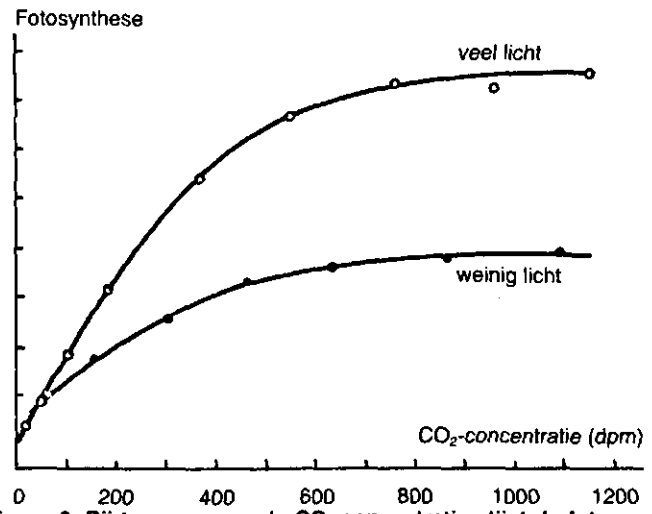
Fotosynthese, ademhaling, CO_2-vaststelling en groei beïnvloed door klimaat



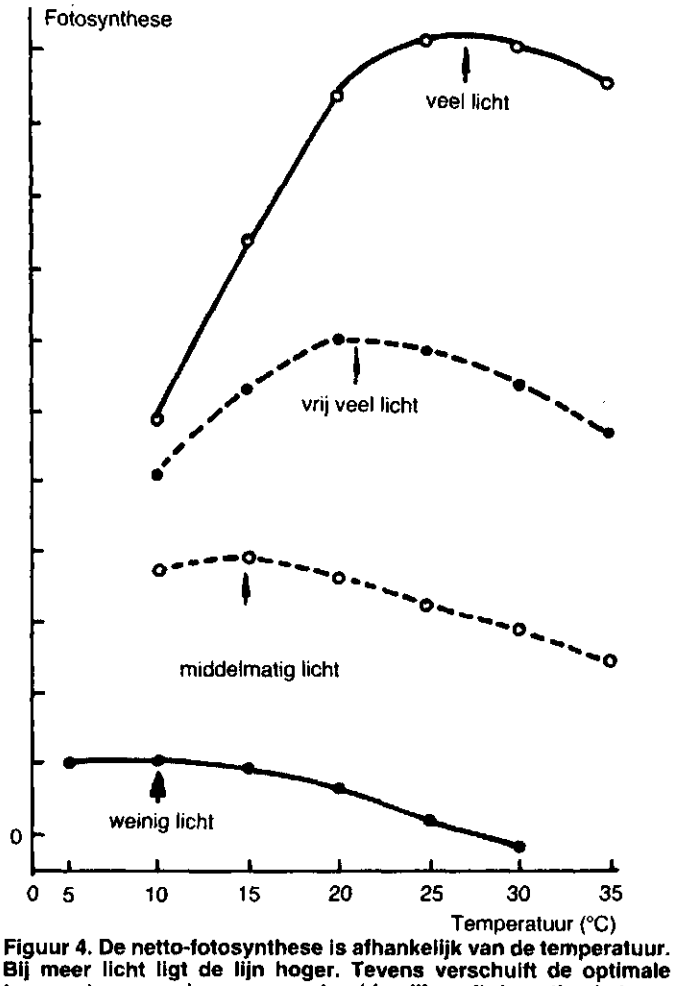
Figuur 1. Bij toename van de temperatuur stijgt de werkelijke fotosynthese en ook de ademhaling. De netto-fotosynthese (het verschil tussen fotosynthese en ademhaling) neemt eerst toe en gaat dan dalen. Bij de pijl ligt het optimum. Dit plaatje geeft het principe aan: bij tuinbouwgewassen is de ademhaling echter niet zo hoog als hier is weergegeven



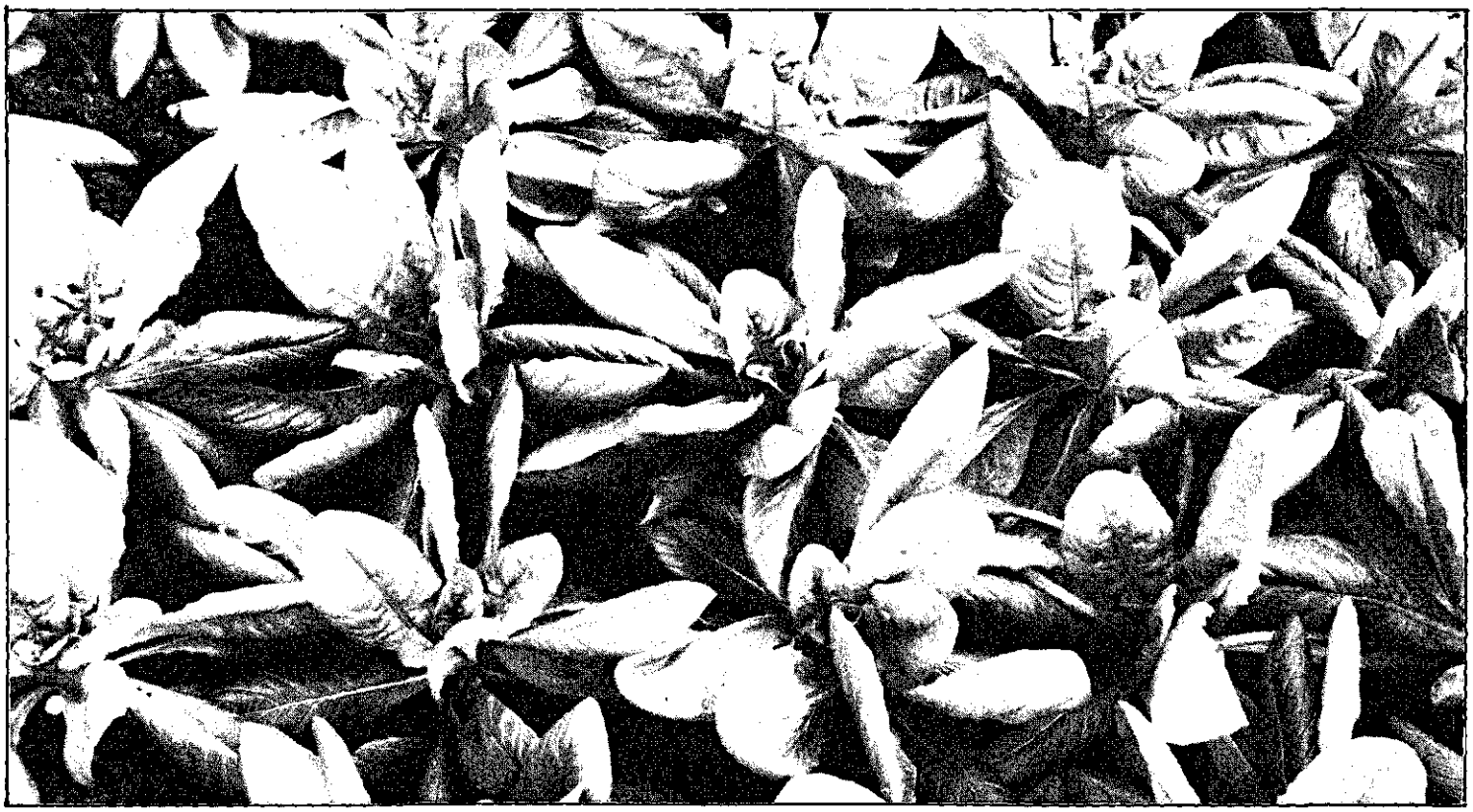
Figuur 2. Bij toename van het licht-niveau stijgt de fotosynthese. Bij hoge CO_2-concentraties kan de fotosynthese hoger worden dan bij lage CO_2-niveau's



Figuur 3. Bij toename van de CO_2-concentratie stijgt de fotosynthese. Bij veel licht kan de fotosynthese hoger worden dan bij weinig licht



Figuur 4. De netto-fotosynthese is afhankelijk van de temperatuur. Bij meer licht ligt de lijn hoger. Tevens verschuift de optimale temperatuur naar hogere waarden (de pijl geeft de optimale temperatuur aan). De CO_2-concentratie is bij alle lijnen hetzelfde gehouden



eigenlijk per etmaal aan droge stof overblijft, dus wat de „groei" in drooggewicht per etmaal is. Hoe neemt de CO_2-hoeveelheid die in het gewas is opgeslagen toe, want dat is uiteindelijk de maat voor produktie en kwaliteit. Waar het werkelijk om gaat is dus in hoeverre de fotosynthese op een dag de verademing van het totale gewas gedurende een heel etmaal overtreft. Een voorbeeld kan dit wat verduidelijken. In de winter, met dagen van zowat vier uur zon, staat de plant toch 24 uur te ademen. Om quitte te spelen, moet de fotosynthesesnelheid in die vier lichturen ongeveer vijf keer zo hoog zijn als de verademing in elk donker uur. Als een plant bij zo weinig licht al zoveel kan presteren, kan er in de zomer natuurlijk helmaal veel gebeuren. Op een zomerse dag met tien keer zoveel licht ontstaat een groot overschot aan suiker.
Hierdoor kan de plant niet alleen een etmaal in leven blijven, maar ook flink groeien of vruchten produceren.
Samengevat zijn er drie maten voor CO_2-vastlegging, namelijk:
- Gram CO_2-opname per cm^2 bladoppervlak per uur.
- Gram CO_2-opname per m^2 gewas per uur.
- Gram CO_2-vastlegging per m^2 gewas per etmaal.

Invloeden op de netto CO_2-opname

De opname van koolzuur door de bladeren vindt alleen plaats als het licht is. De opname-snelheid in de bladeren wordt groter naarmate het licht sterker wordt (**figuur 2**) en ook als de CO_2-concentratie in de kas hoger wordt gemaakt (**figuur 3**). De figuren geven aan dat de netto CO_2-opname positief reageert op hogere lichtintensiteit en hogere CO_2-concentratie. Boven een bepaalde waarde is de toename echter gering.
Wat betreft de temperatuur is het ingewikkelder. Bij hogere temperaturen neemt de fotosynthese toe, maar de verbranding neemt nog sterker toe. Voor de netto CO_2-opname bestaat daarom een optimum-temperatuur. Boven en onder een bepaalde temperatuur is de netto CO_2-opname niet optimaal (**figuur 4**). In figuur 4 is de optimale temperatuur met een pijltje aangegeven. Bij een hoger lichtniveau liggen de fotosynthese en de optimale temperatuur hoger.

Transport van suikers

Suikervorming vindt in de bladeren plaats. Groene bladeren hebben cellen met bladgroenkorrels. In de bladgroenkorrels vindt de fotosynthese plaats: Daar wordt lichtenergie gevangen en CO_2 vastgelegd. De bladeren die het meeste licht vangen maken suiker. Maar de hele plant heeft suiker nodig. Er is dus **suikertransport** nodig van de bladeren naar alle niet-groene of niet-belichte of vlezige organen.
Hoe dat suikertransport plaatsvindt en hoe de distributie tot stand komt, is een verhaal apart. In elk geval is het zo dat in het algemeen bij onze huidige teeltmethoden de groei van alle onderdelen van de planten voldoende is. Dat wil zeggen dat de verdeling van de droge stof redelijk goed is. Er is wel wat te sturen aan de spontane stofverdeling van de plant via het kasklimaat. Maar voorlopig heeft de plant een zeer uitgebalanceerd suikerdistributiesysteem. Dit geldt zowel voor de verdeling over de verschillende organen, als voor de verdeling in de tijd. Want, hoewel de suikerproduktie alleen maar plaatsvindt tijdens zonuren, weet de plant toch 24 uur in leven te blijven. Dus in het distributie-stelsel zit tevens een systeem van reservevorming en verbruiksregeling.

Evenwicht tussen fotosynthese en ademhaling

Door het kiezen van een gewasdichtheid en bepaalde temperaturen wordt geprobeerd het juiste evenwicht tussen groeisnelheid en kwaliteit te vinden. Het is duidelijk dat daarbij rekening moet worden gehouden met de suikervoorziening van het gewas en dat hij dus afhankelijk van de lichthoeveelheden en het koolzuurniveau moet regelen. Op die manier kan de suikerproduktie optimaal in opbrengst worden omgezet.
Hier moet een opmerking worden gemaakt over de onderhoudsademhaling in verband met de omvang van het gewas of de leeftijd van de planten. Kleine, jonge plantjes bestaan voor een groot deel uit blad. De onderhoudsademhaling van de rest van



de plant stelt niet veel voor. Zelfs met weinig licht blijft er in zo'n jong plantje nog suiker over voor de groei. Tijdens het groter worden van de jonge plant zal de situatie heel geleidelijk minder gunstig worden. In het begin zal de stofverdeling een tijdlang ongeveer gelijk blijven doordat het bladoppervlak aanvankelijk even snel toeneemt als de omvang van de rest van de plant. De verhouding tussen ademhaling en groei zal dan dus niet veel veranderen. Toch zal het vangen van de nodige hoeveelheid licht per blad steeds moeilijker worden. De onderste bladeren komen immers steeds meer in de schaduw van de nieuwe bladeren bovenin de plant. Naarmate een gewas in omvang toeneemt, wordt het verschil tussen fotosynthese en ademhaling kleiner. Hierdoor neemt de groei af. De suikerproduktie per cm^2 blad wordt dus minder, maar de hoeveelheid blad neemt toe. De plant gaat in totaal meer licht vangen, waardoor de produktie van de plant als geheel wel toeneemt.
Vervolgens ontstaat de situatie waarin de planten elkaar gaan beschaduwen. Zij worden dan een gewas in plaats van individuele planten. Als het bladoppervlak verder toeneemt, wordt per plant niet meer licht opgevangen, want de ruimte om licht op te nemen wordt beperkt door de omringende planten. Het zwaarder worden van de planten gaat in die situatie dus door zonder dat meer suiker kan worden gevormd. De onderhoudsademhaling gaat een steeds groter deel opeisen en de groeimogelijkheden worden geringer.
Tenslotte komt de plant in de vierde fase, waarin de plant alleen nog maar zwaarder wordt door verdikking van stengels, vergroting van het wortelstelsel en groei van vruchten. In deze fase vindt bladafsterving onder in het gewas plaats. Dit komt door een gebrek aan licht onderin het gewas, waardoor deze te weinig suikers maken en zichzelf min of meer „opeten". In deze volledig volgroeide fase zijn de mogelijkheden voor groei het kleinst.
De plant doorloopt deze vier fasen heel geleidelijk. Langzaam wordt het plantelichaam „duurder" voor wat betreft de ademhalingskosten. Daar moet rekening mee worden gehouden. Kleine planten groeien midden in de winter nog redelijk. Een volgroeid gewas takelt al af in oktober, zodra de dagen wat minder licht zijn. Ruimere plantafstanden en lagere temperaturen geven dan nog wat verlichting. Maar een volgroeid gewas door de winter halen kan eigenlijk alleen maar door het gewas koel te zetten. Op groei mag dan bijna niet worden gerekend en op produktie van vruchten helemaal niet.

Het belang van de groeifactor CO_2 wordt nog eens duidelijk bij deze sla van een vergelijkbare zaai- en plantdatum. Op de linkerpagina werd een laag (150 dpm) CO_2-niveau aangehouden terwijl de sla hierboven bij een hoog CO_2-gehalte werd geteeld.

Samenvatting

Planten voeden zichzelf met koolzuur. Uit CO_2 en water maakt de plant suiker. Suiker is een energie-rijke stof. In groen blad wordt lichtenergie aan CO_2 en water toegevoegd, zodat suiker kan ontstaan. Hoe meer licht een plant ontvangt, des te meer CO_2 wordt vastgelegd tot suiker. Bij meer licht voedt de plant zich sneller met CO_2. Bij meer licht moet dan ook meer CO_2 aan de kaslucht worden toegevoegd om een bepaalde concentratie te handhaven. Bij een hogere CO_2-concentratie is de suikerproduktie hoger. De voeding met suiker is nodig voor het ademhalingsproces. De ademhaling neemt toe bij een hogere temperatuur. Bovendien verademt een grotere plant meer suiker dan een kleine. Groei en kwaliteit worden bepaald door het dagelijkse overschot aan suiker. Er moet meer fotosynthese zijn dan ademhaling wil een plant kunnen groeien.
Een goede CO_2-voorziening, een goede uitwisseling van CO_2 en O_2, een goede verdeling van suiker door de plant en een passend temperatuur-regime zijn nodig voor een goed produktie-niveau.

Effect van CO_2 op groei en produktie

In de afgelopen jaren is bij verschillende gewassen en in verschillende situaties onderzoek gedaan naar het effect van CO_2 op de groei en de produktie van groentegewassen. Vooral door de betere mogelijkheden om de gehalten goed te meten en te regelen, kreeg het doseren van CO_2 zowel in de praktijk als in het onderzoek nieuwe impulsen.



Bij een verhoogd CO_2-gehalte groeit sla sneller en is beter van kwaliteit

In dit artikel zal de grote lijn worden weergegeven, zoals die bij een aantal groentegewassen is gevonden. Behalve de onderzoeksgegevens zijn er uiteraard veel praktijkervaringen. Voor zover deze ervaringen aanvullende informatie geven, worden ze vermeld.

Botersla en ijsbergsla

Bij een bladgewas als sla is het gewicht van de bladmassa op het moment van de oogst van groot belang voor de uiteindelijke opbrengst. Zwaardere sla brengt per krop gemiddeld een hogere prijs op. Gewassen als andijvie en spinazie geven bij een hogere kilo-opbrengst per oppervlakteeenheid uiteraard ook een hogere financiële opbrengst. Een snelle (vegetatieve) groei is bij deze gewassen dus van belang om in een bepaalde tijd tot zo hoog mogelijke opbrengsten te komen.

Verhoging van het CO_2-gehalte is een mogelijkheid om de groei positief te beïnvloeden. Bij proeven met botersla en ijsbergsla – die in 1983 zijn genomen op het proefstation in Naaldwijk – is die invloed duidelijk aangetoond (**tabel**). Het bleek dat verhoging van het CO_2-gehalte van 350 naar 1000 dpm een verhoging van het kropgewicht gaf van 30 à 35%. Ook werkt een hoger CO_2-gehalte een wat compactere krop, een mooier gesloten onderkant en wat dikker blad in de hand. De kwaliteit wordt door het doseren van CO_2 dus in positieve zin beïnvloed.

ten beneden 350 dpm (ongeveer de natuurlijke waarde) aangehouden. Verlaging tot circa 200 dpm betekende dat het kropgewicht ongeveer 20% lager werd dan bij 350 dpm. Bij het lage gehalte was bovendien de kwaliteit slecht: lange, smalle bladeren en nauwelijks kropvorming.

Bij ijsbergsla waren de effecten zelfs nog iets groter. Verhoging tot 1000 dpm gaf bij dit gewas een kropgewicht dat circa 40% hoger lag dan bij 350 dpm. Verlaging van het CO_2-gehalte tot 200 dpm gaf hier een reductie van het kropgewicht van circa 40%.

Hiermee is wel aangetoond dat het doseren van CO_2 bij bladgewassen zeker aanbeveling verdient. Daarbij is het op de eerste plaats van belang dat lage gehalten (beneden de natuurlijke waarde) worden voorkomen in verband met het verlies aan kwaliteit. Voor een zo optimaal mogelijke groeisnelheid en kwaliteit zal tijdens de hele teelt een CO_2-niveau van circa 1000 dpm moeten worden nagestreefd. Hoge gehalten, zoals die bij heteluchtgewassen wel voorkomen, veroorzaken bij sla niet zo snel schade. Bij extreem hoge gehalten (boven 10.000 dpm) gedurende een lange periode kan echter wel degelijk schade optreden. Dergelijke gehalten hebben geen voordelen en kunnen beter worden voorkomen.

Versgewichten van botersla en ijsbergsla

CO_2-concentratie	Botersla g/pl	%	IJsbergsla g/pl	%
150	101	−40	96	−53
245	135	−19	141	−32
430	167	100	206	100
790	192	+15	250	+22
1500	217	+30	277	+35
2870	225	+35	292	+42

Komkommer

Komkommer is een gewas waarbij veel CO_2-onderzoek is uitgevoerd. De eerste proeven dateren zelfs al van meer dan 60 jaar geleden. Het meeste onderzoek werd echter de laatste 15 jaar uitgevoerd. Als wordt gekeken naar onderzoek dat representatief is binnen het totaal van de huidige mogelijkheden op het gebied van de klimaatregeling, moeten wij ons beperken tot het onderzoek van de laatste vijf jaar. Op het proefstation in Naaldwijk is in die jaren nagegaan wat de invloed van concentraties tussen 200 en 3000 dpm is op de groei en de produktie. Gezien de schade, in de vorm van bladverdroging, bij concentraties van 1500 dpm en hoger, werd al snel duidelijk dat bij komkommers geen hoge concentraties gewenst zijn. Daarnaast bleek ook dat verhoging van het CO_2-gehalte tot boven 1000 dpm geen zin had, omdat het geen positieve invloed op de produktie had.

Heel sterk was echter de invloed in het lagere gebied. Verhoging van de concentratie van 350 dpm tot 750 dpm bleek tot een opbrengstverhoging van 30 tot 35% te leiden. Indien het gehalte werd verlaagd van 350 dpm naar 200 dpm (bij 200 dpm werd CO_2 weggefilterd) bleef de produktie 20 tot 25% achter. In het traject van 200 tot 750 dpm is het CO_2-effect dus erg groot. Tussen 600 en 800 dpm blijkt de lijn echter sterk af te buigen, zodat boven 800 dpm nagenoeg geen verhoging van de produktie mag worden verwacht.

Bij komkommer is ook duidelijk het positieve effect van doseren in de zomer (veel licht) gebleken. Het is dan uiteraard moeilijk om hoge gehalten te realiseren, omdat veel moet worden geventileerd. Procentueel is de produktiewinst in de zomer ongeveer even groot als in het vroege voorjaar. In kilo's uitgedrukt, gaat het in de zomer dus om grote hoeveelheden. Ook in de zomer is het zinvol aandacht te besteden aan deze groeifactor.

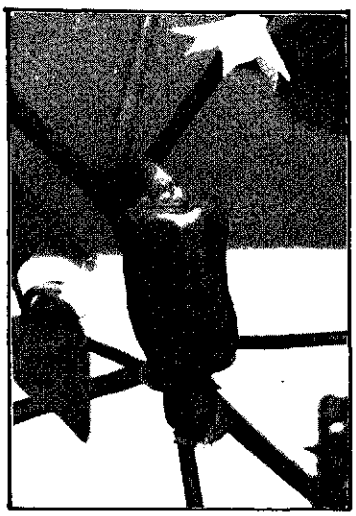
Resumerend kan worden gesteld dat bij komkommers een groot effect van verhoging van het CO_2-gehalte mag worden verwacht. Geadviseerd wordt daarom om in het winterseizoen vanaf het planten een gehalte van 500 à 600 dpm aan te houden, dit gehalte te verhogen tot 600 à 800 dpm vanaf het in produktie komen van het gewas en later in het seizoen (vanaf april), als meer wordt geventileerd en hoge concentraties slechts kort te handhaven zijn, eventueel tijdelijk concentraties van 1000 dpm toe te laten. Dit laatste mag er echter niet toe leiden dat slechts kort kan worden gedoseerd. De beschikbare CO_2 moet zo goed mogelijk over het etmaal worden verdeeld.

Hogere dan de genoemde concentraties zullen de produktie niet of nauwelijks verhogen. Wel wordt de kans op schade bij hogere concentraties groter.

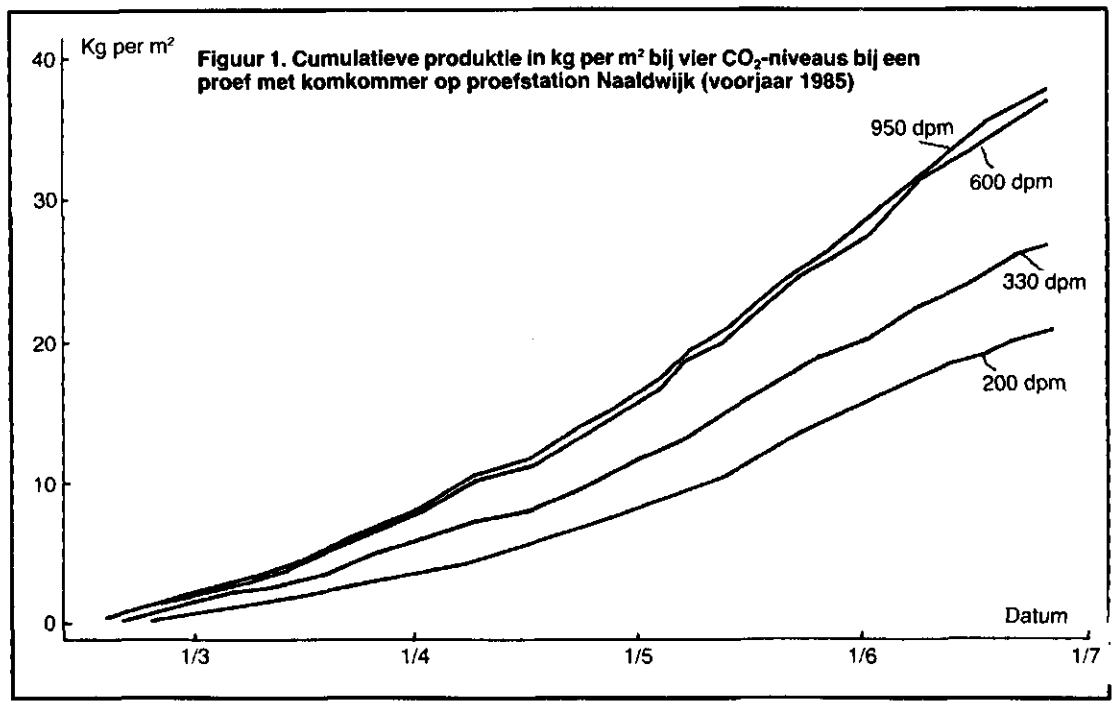
Paprika

Bij paprika is ook een groot effect van CO_2 op de produktie geconstateerd. In een herfstteelt is tevens aandacht besteed aan het effect van CO_2 op de zetting. Getracht is om bij deze proef vanaf begin augustus (begin zetting) CO_2-concentraties aan te houden van 200, 340 en 500 dpm. Daarnaast was er een behandeling waarbij helemaal niet werd gedoseerd. Door het vele ventileren

dat nodig was om te voorkomen dat de temperatuur te hoog opliep, zijn de lage en hoge concentraties vaak niet gerealiseerd. De gerealiseerde gehalten waren respectievelijk 275 tot 325 dpm, 325 tot 350 dpm en 425 tot 450 dpm. Waar niet werd gedoseerd schommelde de concentratie veelal tussen 300 en 350 dpm. Ondanks deze betrekkelijk kleine verschillen tussen de laagste en de hoogste concentratie was de invloed op de zetting opmerkelijk groot. Om deze invloed te kunnen vaststellen, zijn de gezette vruchtjes van een aantal planten tot eind augustus regelmatig verwijderd en geteld. Door de vruchtjes te verwijderen werd voorkomen dat verschillen in plantbelasting (vruchtdracht) de zetting zouden beïnvloeden.
Uitgaand van de gerealiseerde CO_2-waarden, bleek bij verhoging van de concentratie van circa 350 naar 450 dpm het aantal gezette vruchtjes met 55% toe te nemen. Verlaging van circa 350 dpm naar 300 dpm betekende een verlaging van het aantal gezette vruchtjes met circa 25%. Bij 450 dpm bleken dus ongeveer twee maal zoveel vruchtjes te zijn gezet dan bij 300 dpm. Dit is een zeer opvallend verschil.
Bij de produktie waren de verschillen ook duidelijk (**figuur 2**). Waar het gehalte was verhoogd van 350 naar 450 dpm was de kg-opbrengst circa 30% hoger. Deze verschillen werden hoofdzakelijk veroorzaakt door het aantal vruchten. Het vruchtgewicht was bij alle behandelingen vrijwel gelijk. Verlaging naar circa 300 dpm betekende een oogst-reductie van bijna 15%.
Ook bij buitenlands onderzoek werd een grote invloed van CO_2 gevonden. Zo werd in Duitsland bij een hoger CO_2-gehalte een groter aantal bloemen en een vroegere bloei vastgesteld. Ten aanzien van de produktie werd bij dit onderzoek gevonden dat 1000 dpm beter is dan 400 of 2000 dpm.
Paprika blijkt dus – zowel ten aanzien van de zetting als ten aanzien van de produktie – erg gevoelig voor CO_2 te zijn. Het zal duidelijk zijn dat daar bij de teelt rekening mee moet worden gehouden.



Bij paprika bleek de zetting door CO_2 te doseren belangrijk te verbeteren



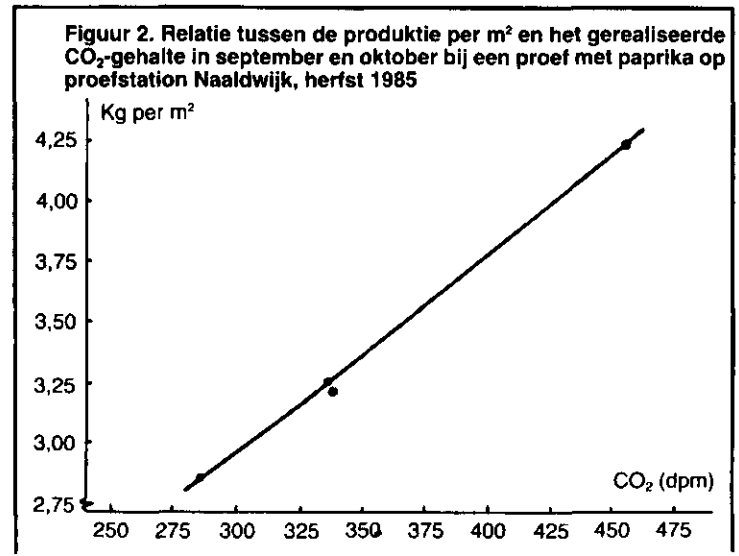
Figuur 1. Cumulatieve produktie in kg per m² bij vier CO_2-niveaus bij een proef met komkommer op proefstation Naaldwijk (voorjaar 1985)

Tomaat

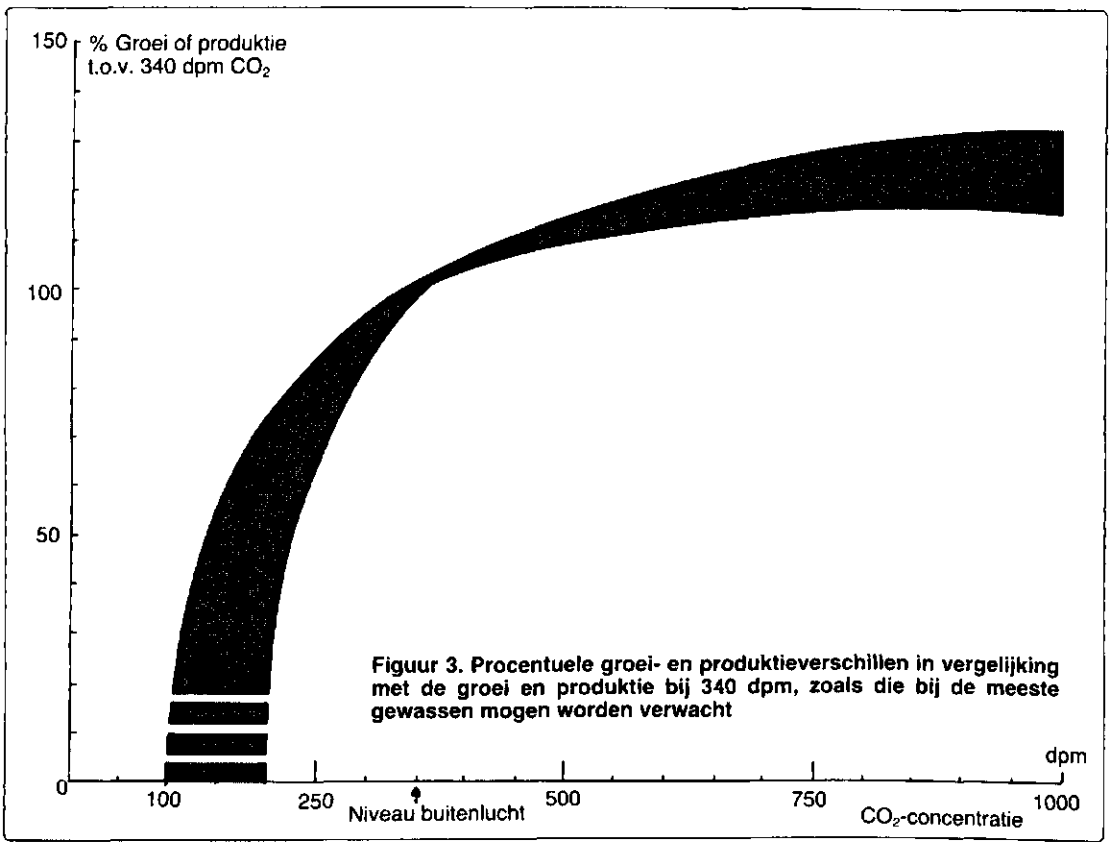
In 1983 is op het proefstation in Naaldwijk ook het CO_2-effect bij tomaat nagegaan. De resultaten zijn nauwelijks afwijkend van die bij de eerder genoemde gewassen. Verhoging van het CO_2-gehalte van 350 tot 750 dpm betekende een verhoging van de produktie met circa 30%. Wanneer het gehalte werd verlaagd van 350 naar 250 dpm, was de oogstreductie ongeveer 20%. Dit zijn belangrijke verschillen, die ook bij dit gewas het belang van CO_2

20 tot 40% produktieverhoging mogelijk

doseren onderstrepen. Gehalten van 1500 en vooral 2800 dpm veroorzaakten nogal wat schade (bladverdroging), waardoor de produktie achterbleef.
De resultaten van dit Naaldwijkse onderzoek worden ondersteund door ervaringen die in het buitenland werden opgedaan. Zowel uit Engels als uit Duits onderzoek kan worden geconcludeerd dat doseren tot maximaal 1000 dpm aan te bevelen is en dat daarvan een produktie-stijging met circa 30% ten opzichte van niet doseren mag worden verwacht.
Zeker ook bij tomaat moet bij het doseren secuur worden gewerkt. Op de eerste plaats kan bij hoge gehalten bladverdroging



Figuur 2. Relatie tussen de produktie per m² en het gerealiseerde CO_2-gehalte in september en oktober bij een proef met paprika op proefstation Naaldwijk, herfst 1985

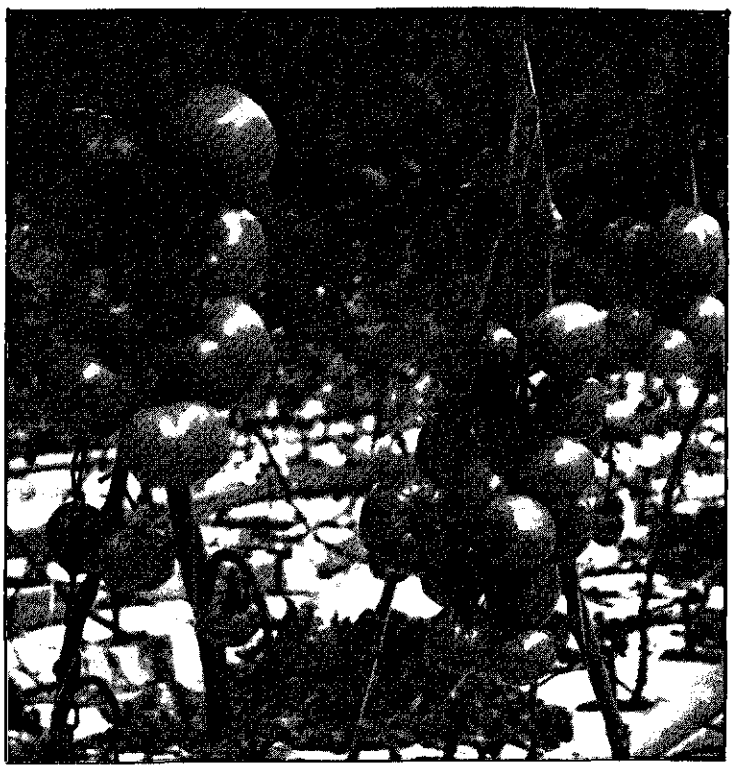


Figuur 3. Procentuele groei- en produktieverschillen in vergelijking met de groei en produktie bij 340 dpm, zoals die bij de meeste gewassen mogen worden verwacht

optreden. Daarnaast echter is de tomaat erg gevoelig voor ethyleen. Dit gas kan ontstaan als de verbranding van bijvoorbeeld aardgas niet goed (onvolledig) is. In dergelijke gevallen wordt ook altijd CO gevormd. Een naar beneden gerichte bladstand wijst op een verhoogd ethyleengehalte. Ook zullen al bij zeer lage ethyleen-concentraties bloemen en knoppen kunnen afvallen, hetgeen uiteraard een directe vermindering van de opbrengst tot gevolg kan hebben. Controle van het CO_2-gehalte en de ethyleenconcentratie (via CO-meting) vraagt daarom bij tomaat extra aandacht.

Andere gewassen

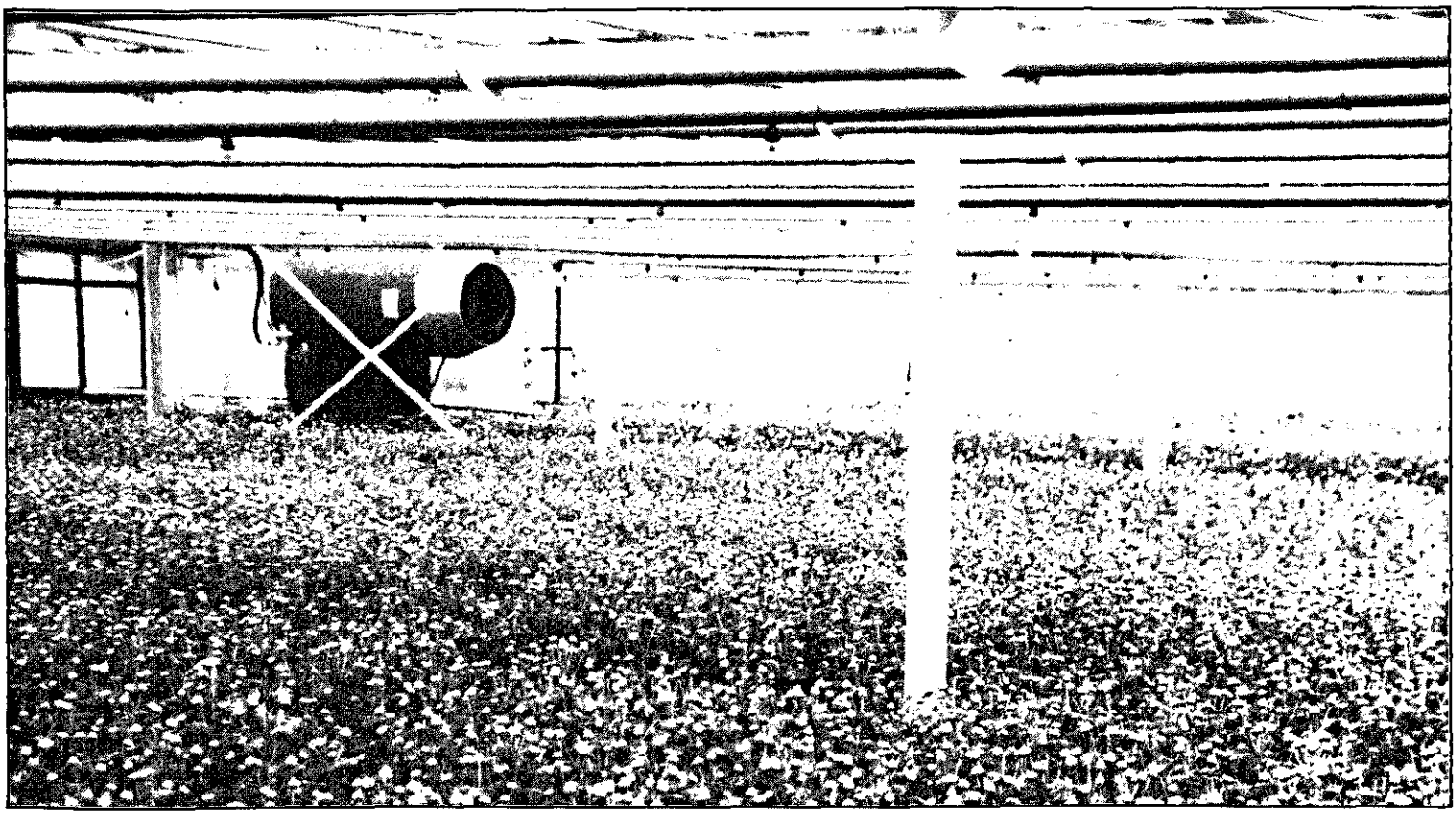
In het voorgaande is van een aantal gewassen vermeld welke invloed van een verhoogd CO_2-gehalte mag worden verwacht op produktie en kwaliteit. Er zijn echter van nog een groot aantal andere gewassen onderzoeksgegevens voorhanden. Het voert te ver deze resultaten allemaal in dit artikel te behandelen. Met het oog op de functie van CO_2 in het



Niet alleen in de vroege voorjaarsmaanden, maar ook in het zomerseizoen is doseren belangrijk om tot een maximale produktie te komen.

noodzakelijk. Het is mogelijk dat er tussen gewassen wat niveauverschillen zullen zijn, maar in grote lijnen zal het effect van een verhoogd CO_2-gehalte op hetzelfde neerkomen. Van aubergine mag dus worden verwacht dat dit gewas op dezelfde manier zal reageren als paprika of komkommer. Voor een siergewas als gerbera zal dit niet veel anders zijn. In **figuur 3** is nog eens weergegeven binnen welke grenzen het effect van de CO_2-concentratie op de verschillende gewassen ligt. Deze figuur is samengesteld op grond van de proefresultaten die bij een groot aantal gewassen zijn vastgelegd. Het blijkt dat de gehalten beneden 340 dpm al snel erg veel produktie kosten. Indien het gehalte wegzakt tot bijvoorbeeld 250 dpm, dan zal de produktie in die uren met 20 à 25% afnemen. Uit onderzoek en praktijkwaarnemingen is gebleken dat op een zonnige dag, zonder doseren, het CO_2-gehalte in zeer korte tijd tot 250 dpm kan dalen. Naarmate er meer licht is, gaat dat sneller. Dit is logisch, omdat de planten bij veel licht ook veel CO_2 opnemen. Juist onder die omstandigheden is het erg schadelijk als het gehalte te laag is.

Daarom is het handhaven van minimaal de buitenluchtwaarde erg belangrijk: Daar mogen zonder meer kosten voor worden gemaakt. De indruk bestaat vrij sterk dat het handhaven van hogere gehalten dan 340 dpm ook in de zomer in veel gevallen economisch verantwoord is. Niet alleen onderzoeksresultaten, maar ook praktijkervaringen wijzen duidelijk in die richting. De „normdosering" voor een CO_2-regeling is veelal het verstoken van 25 m^3 aardgas per ha per uur. Met de rookgassen die daarbij vrijkomen kan het niveau in de teeltruimte meestal op ongeveer 340 dpm worden gehandhaafd, ook als wordt geventileerd. Deze norm zal echter onvoldoende CO_2 opleveren voor het economisch meest optimale gehalte in de kas. Uit de figuur blijkt dat de produktie door het CO_2-gehalte op 450 dpm te handhaven met bijna 20% toeneemt. Dit is een belangrijke produktietoename, die voor zover dat kan worden nagegaan, voor alle gewassen



Ook bij siergewassen zorgt CO_2-dosering voor verhoging van de produktie en kwaliteit

Chrysant

Bij bloemen is kwaliteit in veel gevallen een extra belangrijk aspect. Omdat CO_2 invloed heeft op verschillende kwaliteitskenmerken, moet doseren extra aandacht krijgen.
Bij onderzoek in Noorwegen en Engeland is vastgesteld dat verhoging van het CO_2-gehalte van 300 naar 900 dpm in de winterperiode bij chrysant een verhoging van het takgewicht van 10 tot 15% betekent. Het percentage eerste kwaliteit wordt daarmee verhoogd en daarnaast zal voor de gemiddeld zwaardere takken een hogere prijs worden betaald.
Bij onderzoek in Nederland is naast de verhoging van het takgewicht geconstateerd dat de groei en ontwikkeling van chrysanten wat sneller verloopt bij het verhoogde CO_2-gehalte. De snellere groei resulteerde in een vervroeging van de oogst van drie à vier dagen.
Voor doseren bij chrysant is een waarschuwing tegen ethyleen op zijn plaats. Bij een wat verhoogd ethyleengehalte verloopt de knopvorming zeer vertraagd en

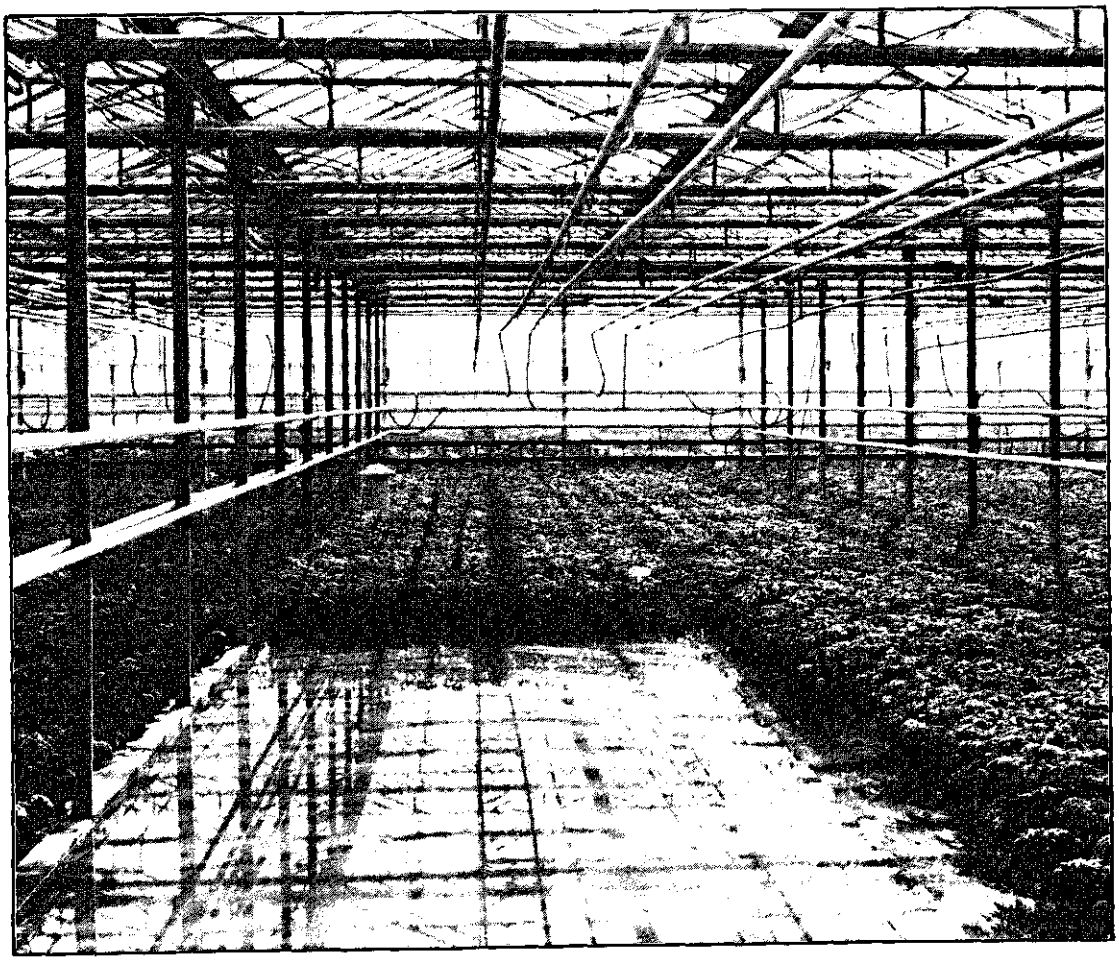
staan. Dit verschijnsel kan al bij gehalten van 0,03 dpm ethyleen optreden. Ethyleen kan ontstaan bij onvolledige verbranding van aardgas en kan dus bij doseren vanuit de ketel in de kas komen. Regelmatige controle is daarom noodzakelijk. De controle op ethyleen kan het makkelijkst gebeuren via een CO-alarm.
Dit alles neemt niet weg dat doseren van CO_2 als een voor de kwaliteit en produktie noodzakelijke teeltmaatregel moet worden gezien en dus niet vanwege eventuele risico's achterwege mag worden gelaten.

Freesia

Freesia is in de praktijk een moeilijk gewas om CO_2 bij te doseren. Enerzijds is de produktie van CO_2 door middel van de verwarmingsketel gering omdat weinig wordt gestookt en anderzijds wordt veel geventileerd, waardoor extra veel CO_2 nodig is om het gehalte flink te kunnen verhogen. Een en ander vloeit voort uit de geringe warmtebehoefte van dit gewas; hogere (grond-)temperaturen kunnen zelfs een belangrijk langere teeltduur be-

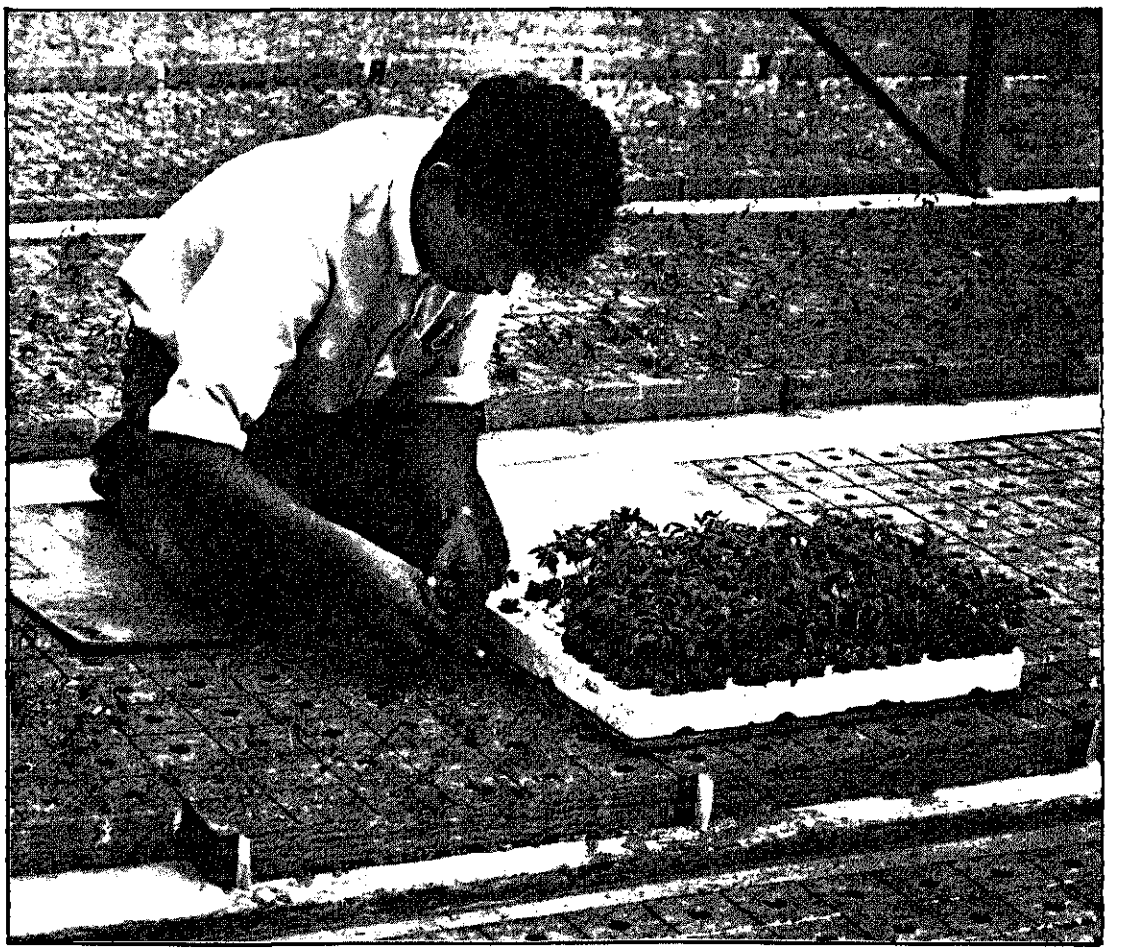
Bij onderzoek op het proefstation in Naaldwijk in het seizoen 1985/86 is gebleken dat ook bij freesia door verhoging van het CO_2-gehalte van de kaslucht een flinke produktieverhoging kan worden bereikt. Bij dit onderzoek is getracht om CO_2-concentraties te realiseren van 200, 340, 600 en 950 dpm. Begin november is met doseren begonnen, maar pas vanaf begin december is regelmatig gedoseerd. Het betrof een freesiagewas dat was geplant op 11 september 1985. In de winterperiode konden de ingestelde concentraties redelijk worden gerealiseerd. Later, in maart en april, was het door het vele ventileren vaak niet mogelijk de streefwaarden te handhaven. Zowel de lage als de hoge waarden kwamen dan dichter bij de controle (340 dpm) te liggen.
Het aantal geoogste takken was bij de streefwaarden 600 en 950 dpm 25 à 30% hoger dan bij 340 dpm. Het lage gehalte van 200 dpm gaf een reductie van het aantal geoogste takken van 20 tot 25% ten opzichte van 340 dpm. Belangrijke verschillen, die overigens nauwelijks afwijken van

merendeel van de groentegewassen.
Bij freesia bestond ook een invloed op het gewicht aan kralen en knollen. Bij 600 en 950 dpm werd ongeveer 20% meer en bij 200 dpm ongeveer 20% minder aan knol- en kraalgewicht geoogst in vergelijking met de oogst bij 340 dpm.
Daarbij komt dat ook de kwaliteit – takgewicht en percentage eerste soort – bij streefwaarden van 600 en 950 dpm beter en bij 200 dpm minder was dan bij 340 dpm.
Het doseren van CO_2 geeft dus naast verhoging van de produktie ook verbetering van de kwaliteit.
Het lijkt dan ook alleszins aan te bevelen om ook bij het telen van freesia's zo mogelijk het CO_2-gehalte van de kaslucht te verhogen. Gezocht zal moeten worden naar mogelijkheden om de praktische problemen op te lossen om zoveel mogelijk uren te kunnen



CO_2 bij de opkweek

Een hoger CO_2-gehalte tijdens de opkweek van plantmateriaal betekent een snellere groei en een betere kwaliteit van het plantmateriaal. In deze bijdrage zal het effect van CO_2 bij de opkweek van plantmateriaal worden behandeld.



500 tot 700 dpm geeft groeiversnelling en kwaliteitsverbetering

Voor groei, dus ook bij de opkweek van plantmateriaal, is CO_2 van doorslaggevend belang. Zonder CO_2 is er van groei geen sprake. Het CO_2-gehalte in de lucht schommelt van nature tussen 300 en 350 dpm. Door dit gehalte te verhogen, kan de groei worden versneld.

Tijd- en kwaliteitswinst

Bij onderzoek met verschillende groentegewassen is geconstateerd dat door verhoging van het CO_2-gehalte van de kaslucht tot 600 à 700 dpm de opkweekduur met circa 10% kan worden bekort ten opzichte van opkweek bij het natuurlijke gehalte van 330 dpm. Het is de vraag hoeveel deze tijdwinst waard is. Het is immers ook mogelijk wat eerder te zaaien en geen CO_2 te doseren. Dat kan dan op de gewenste plantdatum tot dezelfde plantgrootte leiden. Het is echter zo dat het doseren van CO_2 niet alleen tijdwinst, maar ook kwaliteitswinst oplevert. Dit aspect is door vroeger te zaaien niet te compenseren.

De tijdwinst kan met name op plantenkweekbedrijven zeker wel van belang zijn. In eenzelfde tijdsbestek kunnen op dezelfde oppervlakte meer planten worden opgekweekt. Vooral omdat in de winterperiode in een korte tijd erg veel plantmateriaal moet worden verwerkt, kan dat een belangrijk gegeven zijn.

Betere plantkwaliteit

Gebleken is dat planten die bij een verhoogd CO_2-gehalte zijn opgekweekt een hoger droge stofgehalte hebben. De bladeren zijn bijvoorbeeld ook dikker. Dit betekent dat de weerstand van dergelijke planten groter is dan van planten die zonder extra CO_2 zijn opgegroeid. Dat geldt vooral ook voor de kwaliteit van de onderste bladeren. In de laatste periode van de opkweek staan de planten vaak erg nauw. De luchtcirculatie tussen de planten is daardoor vaak erg slecht. Dit wordt nog erger doordat de verwarmingsbuizen op opkweekbedrijven vaak boven in de kas liggen. De tussen de planten aanwezige CO_2 kan snel verbruikt zijn waardoor een tekort ontstaat. Vooral het onderste blad kan dan te weinig CO_2 opnemen en verzwakt.

Wanneer in de kas hogere CO_2-gehalten worden aangehouden, is de kans dat het gehalte tussen de planten tot een zeer laag niveau daalt uiteraard veel kleiner. De kwaliteitswinst van het onderste blad zal daarom vaak relatief erg groot zijn. Zonder CO_2 dosering zijn de onderste bladeren vaak zeer dun en licht van kleur.

Doseren een „must"

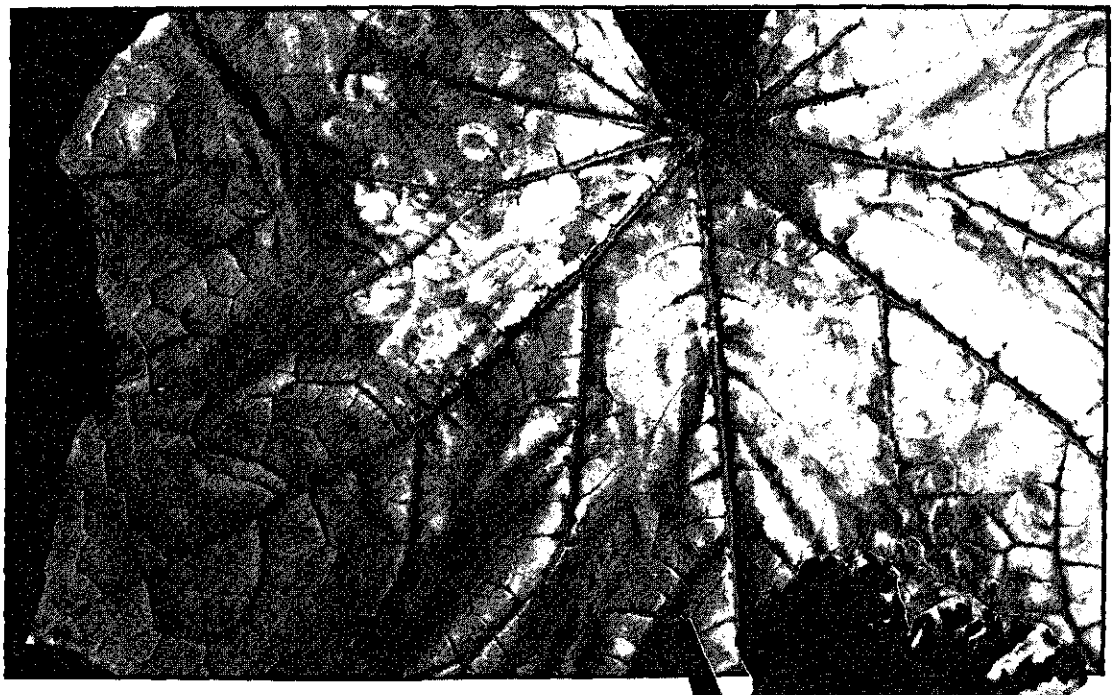
De groeiversnelling, maar vooral de winst in plantkwaliteit, betekent dat bij de opkweek van plantmateriaal het verhogen van het CO_2-gehalte eigenlijk een „must" is. Vooral in de winterperiode is het plantmateriaal van nature erg zwak en de mogelijkheid om met doseren de planten wat steviger te maken, moet zeker worden aangegrepen.

Daarbij is het natuurlijk van groot belang dat geen onnodige risico's worden genomen. Dat betekent dat het gehalte niet te hoog mag oplopen. Een concentratie van 500 tot 700 dpm is voldoende. Een hoger niveau is voor het bereiken van de positieve effecten niet nodig en de kans op schade neemt bij hogere gehalten snel toe.

Ook bij de opkweek zijn de rookgassen uit de ketel meestal de CO_2-bron. Daarom moet ervoor worden gezorgd dat de verbranding zeer goed is. Bovendien moet continu worden gecontroleerd of er eventueel CO in de rookgassen aanwezig is.

Samenstelling kaslucht

Door een verhoging van het CO_2-gehalte van de kaslucht kan de groei van planten worden versneld en de produktie worden verhoogd. In het algemeen wordt CO_2 gebruikt die vrij komt bij het verbranden van aardgas. Bij deze verbranding kunnen behalve CO_2 ook andere gassen vrij komen, die schadelijk zijn voor de planten. Daarnaast kan CO_2 onder bepaalde omstandigheden ook nadelig zijn voor het gewas. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op deze schadekansen.

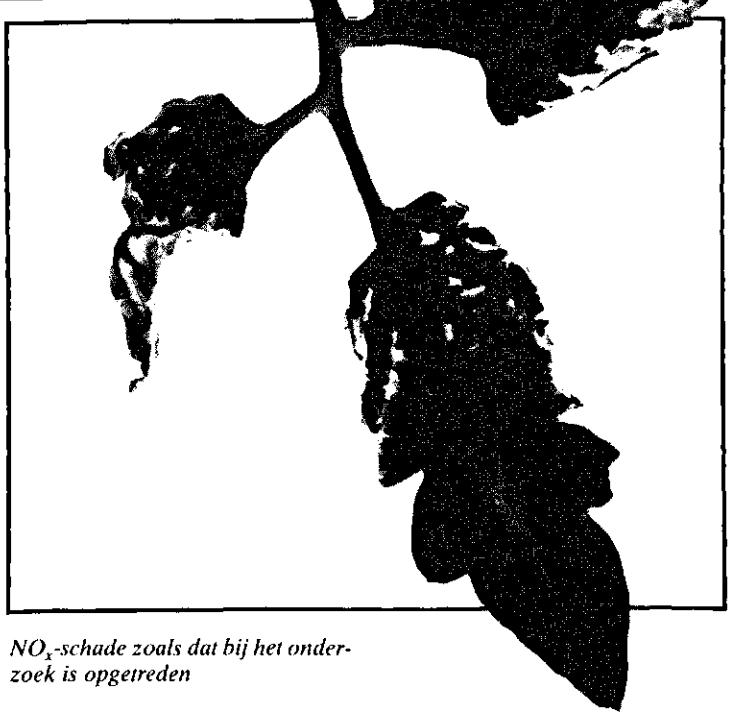


Bij een langdurig (te) hoog CO_2-gehalte kan bladverdroging optreden

Bij de verschillende gewassen is gesproken over het niveau van de gewenste concentratie CO_2. De gegeven adviezen zijn niet alleen ingegeven door de produktiemogelijkheden, maar ook door de kans op schade bij (te) hoge CO_2-gehalten. Een verhoging van het CO_2-gehalte van de kaslucht betekent dat de huidmondjes van de bladeren meer gaan sluiten.
Dit proces begint al op te treden bij 500 dpm en is bij 2000 dpm erg groot. Naarmate het gehalte hoger is, zijn de huidmondjes dus meer gesloten. Als de huidmondjes meer gesloten zijn, zullen de planten uiteraard minder verdampen, waardoor ook minder voedings-ionen worden opgenomen.

Zwak weefsel en bladverdroging

Dit betekent dat het plantenweefsel verzwakt; er zijn onvoldoende bouwstenen aanwezig voor de produktie van stevig weefsel. Dit zwakke weefsel is zeer gevoelig voor klimaatsveranderingen. Vooral als de instraling wat groter wordt, sterft weefsel af en is sprake van zogenaamde bladverdroging. In de ernstigste gevallen verdroogt een groot deel van de aanwezige bladeren, wat zeer veel schade kan betekenen.
Het verzwakken van een plant onder invloed van hoge CO_2-concentraties kan alleen plaatsvinden als gedurende een vrij lange periode te hoge concentraties worden aangehouden. Daarbij moet meer aan een periode van weken en niet aan een of twee dagen worden gedacht. Het wel of niet optreden van schade wordt mede bepaald door bijkomende factoren.
Zo zal de heersende luchtvochtigheid een rol kunnen spelen. Bij een hoge luchtvochtigheid is de kans op schade groter. Bij het gebruik van een scherm zien we dan ook meer schade. Ook een hoge temperatuur geeft een vergrote kans op schade. Het weefsel is bij de hogere temperatuur al zwakker, waardoor de schadedrempel lager zal liggen en dus eerder wordt gepasseerd.



NO_x-schade zoals dat bij het onderzoek is opgetreden

Later in het seizoen minder problemen

In april en mei kunnen veel hogere concentraties worden aangehouden dan in de wintermaanden. Het weefsel is later in het voorjaar van nature al veel steviger, waardoor er belangrijk minder kans op schade is. De grotere instraling in april en mei betekent dat de verdamping ook bij enigszins gesloten huidmondjes nog altijd voldoende groot is om voldoende ionen op te nemen. Ook onder die omstandigheden wordt dus stevig weefsel gevormd.
Met het oog op het bovenstaande blijft het advies echter de concentratie niet hoger te houden dan uit het oogpunt van produktie (groeisnelheid) gewenst is. De grote lijn die daarbij kan worden aangehouden, is bij jonge planten (opkweek) te streven naar 500 à 600 dpm; in de eerste periode van de teelt naar 600 à 700 dpm en vanaf maart bij producerende gewassen van een gehalte van 700 à 800 dpm uit te gaan.
Bij de genoemde gehalten zal nagenoeg het maximale voordeel

van CO_2 kunnen worden behaald en zijn de kansen op schade klein. Dit laatste betekent niet dat bij deze gehalten geen bladverdroging kan optreden. We zien deze schade soms zelfs als in het geheel niet wordt gedoseerd. Het gewas is dan echter door andere oorzaken zodanig verzwakt dat bladverdroging kan ontstaan. Op bedrijven waar dit euvel optreedt, is men vaak geneigd met het doseren van CO_2 te stoppen. Dit is in het algemeen onjuist. Een plant die blad heeft verloren als gevolg van bladverdroging zal met het overblijvende groene blad zoveel mogelijk moeten kunnen assimileren om het verlies weer aan te vullen. Om maximaal te kunnen assimileren, is een verhoogd CO_2-gehalte noodzakelijk, zodat moet worden doorgegaan met CO_2 doseren.

Ethyleen

Dit is een gas dat al in zeer lage concentraties invloed op de planten kan hebben. Het is van nature in zeer lage concentraties in de plant aanwezig en stuurt verschillende processen, zoals de rijping en veroudering. Deze processen kunnen echter bij het te hoog oplopen van het ethyleengehalte in de kaslucht teveel worden versneld. Zo zien we bij een verhoogd ethyleen-gehalte van de kaslucht dat tomatenbladeren sterk naar beneden worden gericht en dat de bloemknoppen bij dit gewas dicht blijven en makkelijk afvallen. Het meest gevoelig zijn de knoppen vlak voor de bloei. In de ernstigste gevallen kan bij tomaat ook bladvergeling optreden.

Paprika reageert ook met knopval en in de ergste gevallen bladvergeling op een te hoog ethyleengehalte. Bij freesia en chrysant blijft de knopontwikkeling achter, terwijl bij chrysant ook de zijscheuten in groei achterblijven en de bladeren kleiner zijn. Anjer tenslotte verwelkt vroegtijdig bij enigszins verhoogde ethyleengehalten.
Deze opsomming is zeker niet volledig, maar toont wel de ernst van de schade die zich kan voordoen. Het is dan ook van het grootste belang ervoor te zorgen dat het ethyleengehalte voldoende laag blijft.

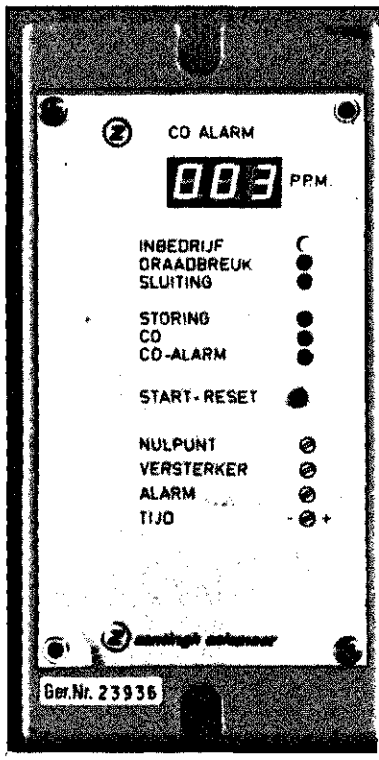
In het algemeen kan worden gesteld dat het gehalte nooit boven 0,05 dpm (50 ppb) mag komen. Hogere gehalten zullen vaak schade tot gevolg hebben. Zelfs het gehalte van 0,05 dpm is niet onder alle omstandigheden volkomen veilig. Bij dit gehalte is bij verschillende gewassen namelijk al remming van de knopontwikkeling geconstateerd en bij tomaat kan al knopval optreden. Probeer daarom het gehalte nog lager te houden.
Omdat ethyleen kan worden gevormd als de verbranding van aardgas niet voor 100% volledig is en we de verbrandingsgassen in de kas brengen om het CO_2-gehalte te verhogen, is een regelmatige controle van de verbranding noodzakelijk. Ethyleen is echter moeilijk te meten; eigenlijk alleen in een laboratorium. Veel makkelijker kan worden aangetoond of CO (koolmono-oxide) in de verbrandingsgassen voorkomt. Wanneer dat zo is, moet worden aangenomen dat in de verbrandingsgassen ook ethyleen voorkomt. Het doseren kan dan beter worden gestopt tot de brander is bijgesteld. CO kan worden aangetoond door middel van zogenaamde indicatorbuisjes. Deze verkleuren als CO aanwezig is. In het algemeen is het aan te bevelen een CO-detector, die continu het CO-gehalte in de rookgassen meet, te installeren. Door middel van dit apparaat wordt bij de aanwezigheid van een te hoog gehalte CO het doseren direct gestopt.

Stikstofoxiden

Bij de verbranding van aardgas wordt veel lucht gebruikt. Omdat lucht voor ongeveer 80% uit stikstof bestaat, komt er dus ook veel stikstof in het verbrandingsproces terecht. Een deel van die stikstof kan daarbij verbranden, waardoor NO en NO_2 (gezamenlijk NO_x genaamd) in de verbrandingsgassen kunnen ontstaan. NO_x kan ook uit de bodem of van buiten in de kas komen. Het doseren van verbrandingsgassen uit de ketel is dus niet de enige NO_x-bron. Wanneer onder bepaalde omstandigheden zowel uit de grond, van buiten als uit de ketel NO_x in de kas wordt gebracht, kan makkelijk een schadelijk niveau worden bereikt. De schade

Gevaar bij teveel doseren: schade door NO_x, ethyleen en overmaat CO_2

kan op de eerste plaats tot uitdrukking komen in een kleinere assimilatie en daardoor een geringere groei of kleinere produktie. Als de NO_x echter oplost in water dat op de planten aanwezig is – bijvoorbeeld nadat condensatie op het gewas heeft plaatsgevonden – kan ook bladverbranding optreden.
Al in lage concentraties – 0,3 dpm, (300 ppb) – kan door deze gassen een remming in de groei worden veroorzaakt. Een dergelijke remming is onder praktijkomstandigheden nagenoeg nooit te constateren. Alleen in vergelijkende proeven kan de remming worden vastgesteld. In proeven is vastgesteld dat het positieve effect van CO_2 voor een groot deel teniet kan worden gedaan door de aanwezigheid van NO_x. Bij deze proeven was het gehalte NO_x 1 dpm (1000 ppb). Dat is hoger dan gemiddeld in de praktijk zal voorkomen als gevolg van het doseren tot een CO_2-gehalte van 1000 dpm. Het is echter duidelijk dat we moeten oppassen en vooral ook een reden het CO_2-gehalte niet hoger op te voeren dan nodig is. Het uitgangspunt „Baat het niet, dan schaadt het niet" is in dit verband dan ook zeker niet van toepassing. Bij een hoger CO_2-gehalte zal immers ook het NO_x-gehalte hoger kunnen zijn.



Ethyleen is moeilijk te meten. Veel makkelijker kan worden aangetoond of CO in de verbrandingsgassen voorkomt

Dichtere kassen

Vooral ook het dichter zijn van de kassen, waardoor gassen die in de kas komen minder snel naar buiten zullen ontwijken, moet een reden zijn om voorzichtig te zijn. Het gehalte aan schadelijke gassen zal door het lagere ventilatievoud tot hogere waarden kunnen oplopen. De CO_2 wordt door de planten uit de kaslucht opgenomen en de schadelijke gassen blijven er achter. Deze schadelijke gassen zullen, doordat regelmatig wordt gedoseerd, kunnen accumuleren tot de schadelijke grens. Wees daarvan bewust. Doseer niet hoger dan gewenst voor een goede produktie en controleer waar mogelijk de samenstelling van de lucht.

CO_2 doseren: Wanneer, hoelang, hoeveel?

Bij vrijwel alle teelten in kassen is CO_2-dosering een gebruikelijke teeltmaatregel geworden. Een vraag die zich altijd voordoet is: Hoe moet worden gedoseerd, wanneer, hoe lang en vooral hoeveel? Over deze vragen gaat dit hoofdstuk. Wanneer is doseren zinvol? Welke streefwaarde houden we aan voor CO_2? En hoe moet het CO_2-niveau worden aangepast aan het seizoen en aan de omstandigheden?



Doseren alleen overdag vooral bij veel licht: 700 tot 900 dpm

Een verhoging van de CO_2-concentratie heeft in het algemeen een positief effect op de groei van planten. Hoe groot het effect van CO_2-verhoging op een bepaald moment is, is afhankelijk van andere factoren, zoals licht, temperatuur en de watergift. Dit is verklaarbaar met de theorie van de beperkende factor. Deze theorie zegt dat er altijd een factor is die het minst optimaal („beperkend") is.
In de winter is er weinig licht, maar wel een goede CO_2- en watervoorziening. Licht is dan de beperkende factor: Door meer licht kunnen de CO_2-opname en de groei worden verbeterd (**figuur 1**). Soms is de temperatuur beperkend, zoals in **figuur 2**: Meer CO_2 heeft dan niet veel effect, meer warmte is belangrijker. Later in het voorjaar zijn vaak licht, temperatuur en de watervoorziening in orde, maar is het CO_2-niveau beperkend. Verhoging van het CO_2-niveau leidt dan tot vergroting van de groei.
Het is nu begrijpelijk dat verhoging van het CO_2-niveau tot heel hoge concentraties (bijvoorbeeld boven 900 dpm) meestal geen zin heeft. Het heeft alleen nut als CO_2 op dat moment (bij 900 dpm) nog enigszins de beperkende factor is. Dat wil zeggen dat alle andere factoren (licht, temperatuur, watervoorziening en bemesting) op een heel hoog peil moeten zijn. In de praktijk zal dat vrijwel nooit het geval zijn, zodat in het algemeen een verhoging tot boven 900 dpm geen zin heeft. Een te hoog CO_2-niveau kan zelfs meer kwaad doen dan goed.

's Nachts CO_2 doseren?

De groei verbetert bij hogere CO_2-niveaus doordat de fotosynthese toeneemt. Fotosynthese (of assimilatie) is de opname van CO_2 door het gewas **onder invloed van licht**. CO_2 doseren heeft daarom alleen zin als het licht is. 's Nachts doseren heeft beslist geen effect, behalve in twee uitzonderingsgevallen. De eerste uitzondering is 's nachts tijdens bijbelichting (assimilatiebelichting), zoals die soms wordt toegepast bij plantenopkweek en bij bloemisterijgewassen. Als er weinig licht is, dan kan de plant dit beter benutten als (veel) CO_2 wordt gegeven. CO_2-dosering kan dan bijdragen aan een verdere produktieverhoging. De tweede uitzondering is een potplantensoort die anders reageert, namelijk de Kalanchoeachtigen. Alleen deze ene soort bezit een mechanisme om 's nachts in het donker CO_2 te kunnen opnemen en opslaan tot het licht wordt. Het is zinloos om te proberen of andere planten dit ook kunnen, want dat is beslist uitgesloten. De enige reden om in de (na)nacht te doseren is dat er in de kas een voorraad CO_2 voor de dagperiode wordt aangelegd. Hier is natuurlijk niets op tegen, mits het CO_2-niveau niet te hoog wordt (liefst niet boven 900 dpm).

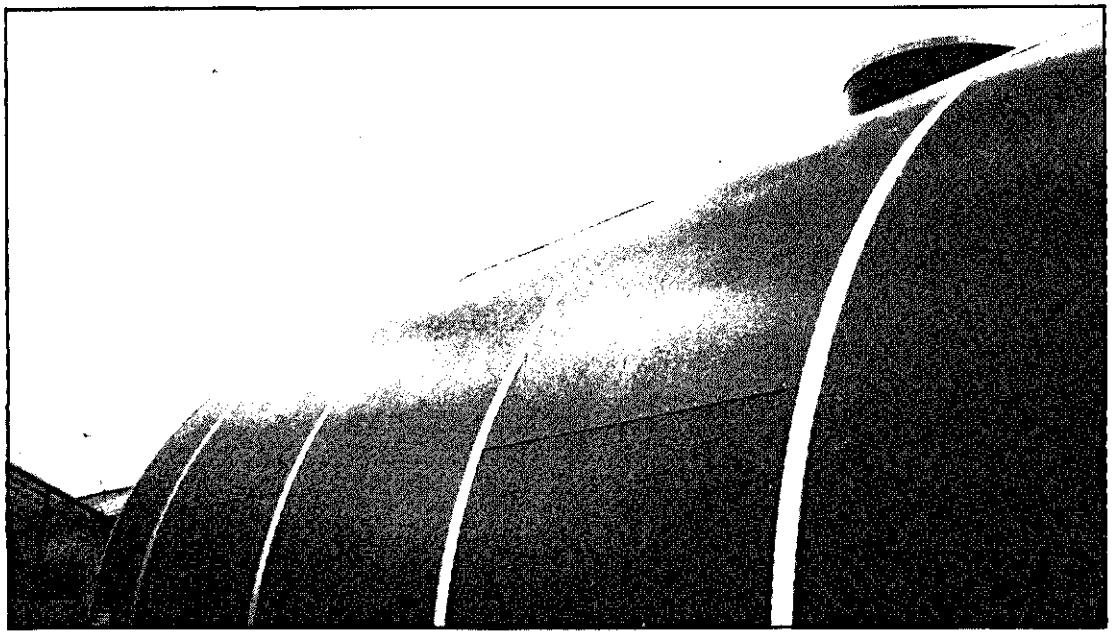
Oppassen voor teveel CO_2

In de winter is de regeling van het CO_2-niveau belangrijk, omdat planten beter van het weinige licht profiteren als CO_2 wordt gegeven. Er moet echter worden opgepast dat **niet teveel** wordt gedoseerd. Ten eerste heeft teveel dosering meestal geen nut, want als het CO_2-niveau al vrij hoog is, is CO_2 niet de beperkende factor.

Zelfs kan een te hoog CO_2-niveau meer kwaad doen dan goed. Extreem hoge waarden (bijvoorbeeld 5000 dpm) kunnen een directe, zichtbare beschadiging geven. Minder bekend is dat „onzichtbare" schade kan optreden als enige tijd (een aantal uren per dag, gedurende een aantal dagen achter elkaar) een vrij hoog gehalte (bijvoorbeeld 1500 dpm) wordt aangehouden. In dat geval wordt niets vreemds waargenomen, maar de kwaliteit van de planten en ook de groei en produktie worden ongemerkt negatief beïnvloed. Vooral jonge planten in de winter hebben hier snel last van. In dit geval kan beter een veilige waarde worden aangehouden, bijvoorbeeld maximaal 700 dpm CO_2 in plaats van 900 dpm.
De verklaring voor het nadelig effect van een te hoog CO_2-niveau is de volgende: Een hoge CO_2-concentratie maakt dat de huidmondjes zich min of meer gaan sluiten. Bij hoge CO_2-concentraties zijn alle huidmondjes gesloten. Dit heeft tot gevolg dat

CO_2 is een goedkope „grondstof" in verhouding tot wat het opbrengt. Zelfs bij ruim ventileren kan het nog economisch rendabel zijn om tot bijvoorbeeld 400 of 450 dpm te doseren

geen verdamping meer plaatsvindt en dus ook geen watertransport. De bladeren krijgen daardoor te weinig voedingselementen aangevoerd en dit leidt tot een zwak en kwetsbaar gewas. Vooral bij een plotselinge weersovergang kan dan een zichtbare schade optreden in de vorm van bladverwelking of -afsterving, meestal bladverdroging genoemd.
Bij extreem hoge CO_2-concentraties (bijvoorbeeld 10.000 dpm, zoals bij heteluchtteelten voorkomt), is nog iets anders aan de hand. De huidmondjes zijn dan niet meer in staat normaal te reageren en staan vaak wijd open. Vanzelfsprekend zullen dan problemen ontstaan, vooral als er plotseling wat zon komt.
Een andere reden om voorzichtig te zijn met te hoge dosering is dat er uit de brander misschien schadelijke gassen kunnen meekomen (bijvoorbeeld NO_x). Hoewel hierover nog niet alles bekend is, is het wel duidelijk dat planten schade ondervinden als ze enige tijd aan NO_x worden blootgesteld. Bij een geringe dosering zal uiteraard een geringere hoeveelheid schadelijke gassen uit de ketel de kas inkomen.
Vanwege de genoemde risico's wordt geadviseerd in het algemeen niet meer dan ongeveer 900 dpm te doseren en bij een gevoelig wintergewas niet meer dan 700 dpm. Bij heteluchtteelten is dit een onmogelijke zaak. In de strenge winterperiodes van de afgelopen jaren is er dan ook veel zichtbare schade opgetreden en waarschijnlijk ook heel veel „onzichtbare" schade in de vorm van groeistagnatie. Het is belangrijk dat ook bij deze teelten aandacht besteed gaat worden aan het doseren van CO_2.

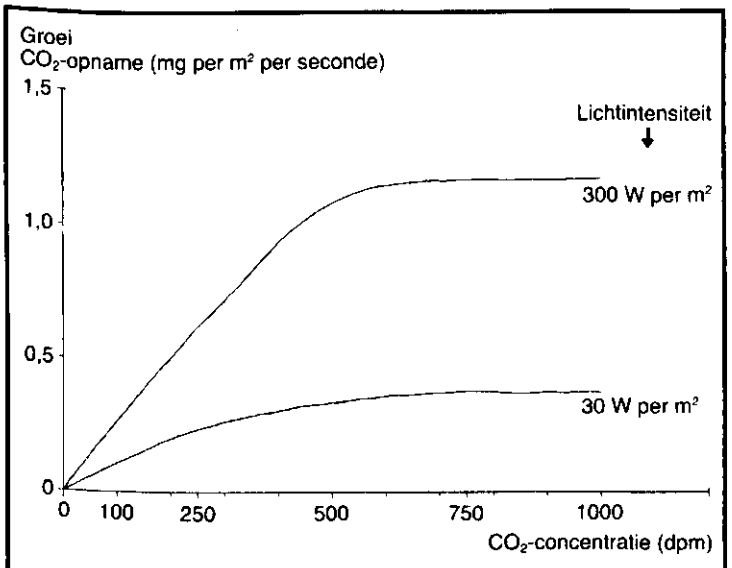


In voorjaar en zomer blijven doseren

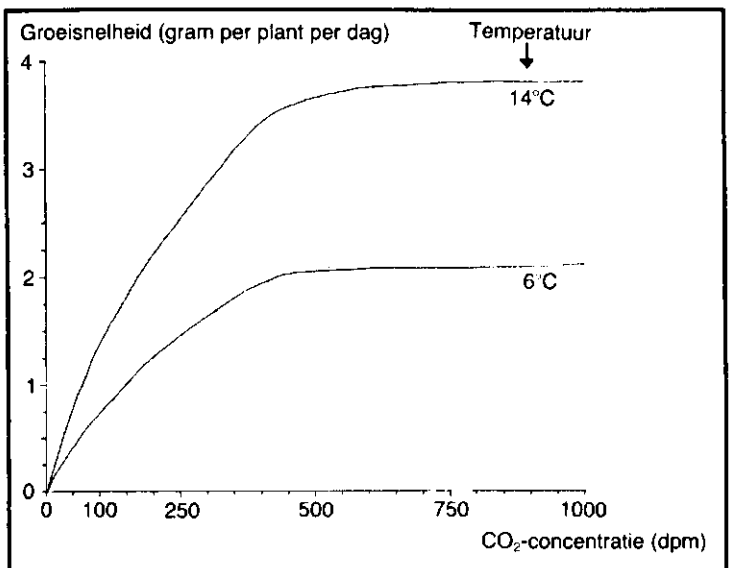
In de voorjaar- en zomerperiode kan de dosering ingewikkeld worden. Met een aantal zaken moet rekening worden gehouden, bijvoorbeeld met de beschikbare hoeveelheid CO_2, de kostprijs van CO_2 op momenten dat geen rookgas beschikbaar is, de capaciteit van een warmtebuffer en de opbrengstverhoging die

Economische berekeningen hebben uitgewezen dat een warmtebuffer in de meeste gevallen een rendabele investering is

CO_2 veroorzaakt.
Hier worden enkele richtlijnen beschreven die bij de keuze van de streefwaarde kunnen meespelen.
In de toekomst kan de computer worden ingezet om de streef-



Figuur 1. Effect van CO_2 en licht op de groei van tomaat. Bij meer CO_2 is de groeisnelheid hoger en bij een CO_2-niveau van ongeveer 750 dpm is de maximale groei bereikt. Bij te weinig licht is de groei beperkt, ook al is er veel CO_2: Licht is dan de beperkende factor.

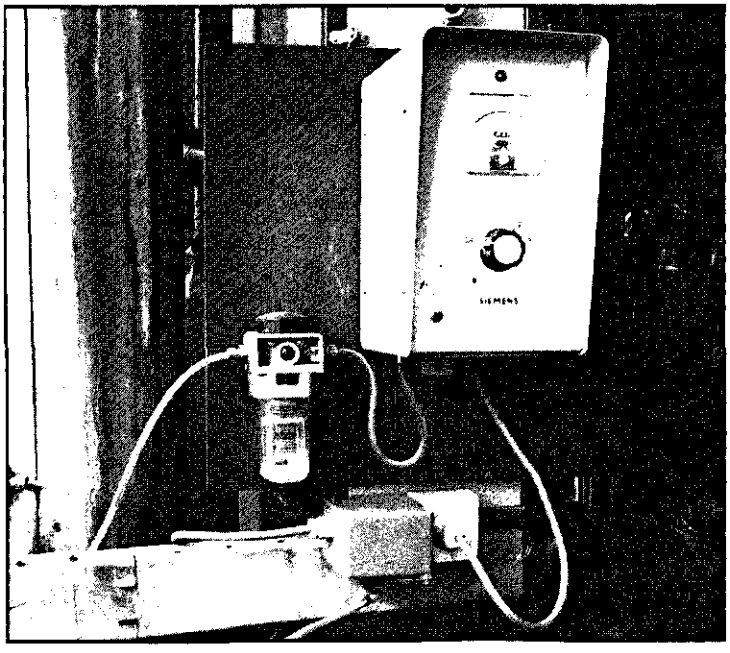


Figuur 2. Effect van CO_2, licht en temperatuur op de groei van sla. Bij meer CO_2 is de groeisnelheid hoger. In dit geval wordt de maximale groei al bereikt bij 500 à 600 dpm. Bij een te laag temperatuur- en/of lichtniveau is de groei beperkt ondanks de hoge CO_2-niveaus. Temperatuur en licht zijn de beperkende factoren.

waarde voor CO_2 te berekenen. Dit wordt beschreven in een volgend artikel over optimalisatie van het CO_2-niveau.
Als niet de hele dag hoeft te worden gestookt, kan de dosering van CO_2 in het gedrang komen. Er is dan vaak alleen 's nachts en tijdens de ochtenduren CO_2 beschikbaar. Uit het oogpunt van de produktie is het echter zeer wenselijk om te trachten een verhoogd CO_2-niveau te realiseren, vooral ook midden op de dag, tijdens de meest lichte uren. CO_2 is een goedkope „grondstof" in verhouding tot wat het opbrengt. Zelfs bij ruim ventileren kan het nog economisch rendabel zijn om tot bijvoorbeeld 400 of 450 dpm te doseren. Er zijn wel praktische problemen. Er moet namelijk wel veel CO_2 in de kas worden gebracht om het CO_2-verlies door ventilatie te compenseren. Zolang zonder problemen een minimum-buis kan worden aangehouden, is dat een manier om lange tijd met de ketel voldoende CO_2 te produceren. Om toch te kunnen doseren als geen warmte in de kas kan worden gebracht, is warmteopslag een goede oplossing. Een warmtetank verdient zichzelf makkelijk terug, doordat meer CO_2 kan worden gedoseerd en daardoor de produktie omhoog gaat. Economische berekeningen hebben uitgewezen dat een warmtebuffer in de meeste gevallen een rendabele investering is. Een warmte-opslagtank kan in het voorjaar goed worden gebruikt om meer te doseren dan minimaal nodig is. Het CO_2-niveau kan zelfs op circa 900 dpm worden gehouden. In de zomer biedt een warmtebuffer de mogelijkheid om de CO_2-tekorten beter op te vangen en gedurende een aantal uren ook meer te doseren dan alleen tot het niveau van de buitenlucht.

Benutting warmtebuffer

Ook al is een warmtebuffer een hele verbetering, hij is altijd te klein om een hele zomerdag een ruime CO_2-voorziening mogelijk te maken. Dan moet worden gekozen: Vooral 's ochtends doseren of vooral midden op de dag of de hele dag door? In de toekomst moet een klimaatcomputer in staat zijn met deze gegevens het beste CO_2-niveau te berekenen.



In de zomer, ook bij ventilatie, moet zeker worden gedoseerd tot de buitenluchtwaarde (ongeveer 340 dpm)

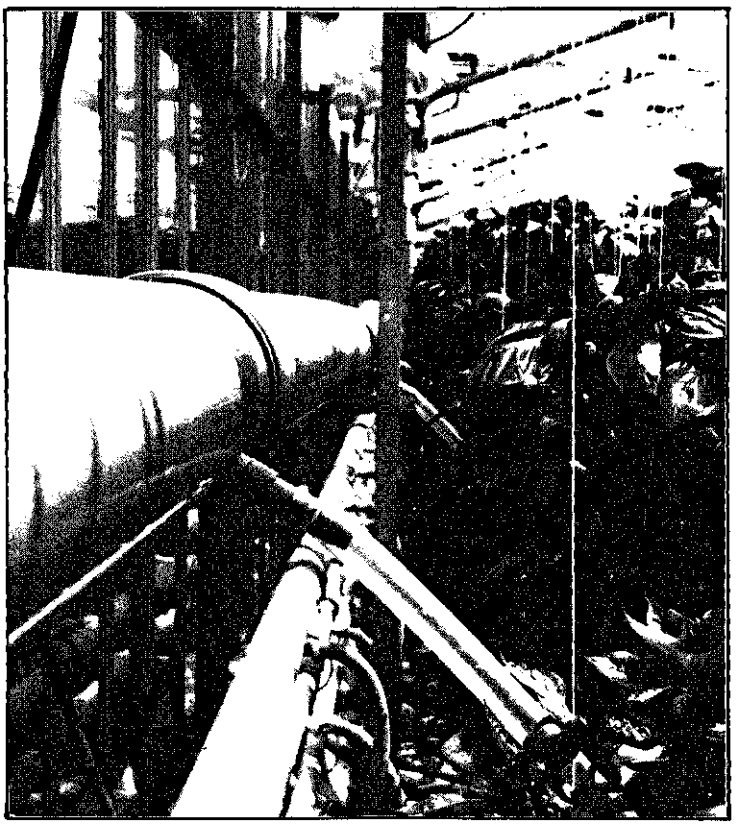
Maar voorlopig moeten we zelf het beste doseerregime kiezen. Hier volgen enkele richtlijnen.
CO_2-dosering is het meest effectief als er veel licht is. Ook is het het meest effectief als het CO_2-niveau laag is. Dit houdt in dat op zomerse dagen ook midden op de dag zou moeten worden gedoseerd. Dan is er veel licht en vaak een tekort aan CO_2. Door CO_2 te doseren tot minimaal het niveau van de buitenlucht kan het gewas beter profiteren van het licht. Men hoeft dan niet bang te zijn dat CO_2 verloren gaat door luchtuitwisseling, zolang het CO_2-niveau in de kas beneden het niveau van de buitenlucht ligt. Immers: Luchtuitwisseling betekent dat de kaslucht (CO_2-arm) wordt vervangen door buitenlucht (CO_2-rijker). Netto komt er dan altijd meer CO_2 naar binnen, zolang het CO_2-niveau binnen lager is dan buiten. Kortom in de zomer, ook bij ventilatie, moet zeker worden gedoseerd tot de buitenluchtwaarde (ongeveer 340 dpm).
Wanneer er binnen in de kas meer CO_2 is dan buiten, gaat er wel CO_2 verloren door ventilatie. Een hoog CO_2-niveau aanhouden is weliswaar zeer nuttig en meestal rendabel, zelfs bij ventilatie, maar er is dan wel veel CO_2 nodig. Een aanwezige warmtebuffer, die altijd maar een beperkte capaciteit heeft, raakt dan gauw vol. Dan moet dus noodgedwongen worden teruggeschakeld naar een wat lagere branderstand. Het advies bij de huidige bedrijfsuitrusting luidt dan: Zoveel mogelijk uren van de dag doseren (met een wat geringere hoeveelheid).
Ook in verband met een warmtebuffer is dit een goede werkwijze. Het is namelijk niet de bedoeling dat na de eerste ochtenduren de buffer al is „volgestookt", maar wel aan het eind van de dag. Hij kan dan 's nachts worden afgekoeld, waarbij de warmte al of niet nuttig wordt gebruikt. Uiteraard kan dankzij de warmtebuffer veel meer worden gedoseerd dan zonder buffer.
Economisch gezien is doseren tot boven het buitenluchtniveau aan te bevelen, ook op een zomerse dag. Praktisch gezien kan worden doorgegaan met doseren zolang men de warmte kwijt kan.

Samenvatting

's Nachts CO_2 doseren is zinloos, behalve in twee uitzonderingsgevallen: Bij assimilatiebelichting en bij het potplantengewas Kalanchoë. In alle andere gevallen nemen de planten 's nachts geen CO_2 op. Hoogstens kan in de (na)nacht een CO_2-voorraad worden opgebouwd voor de volgende dag. Ook dan mag de concentratie niet te hoog oplopen.
Vooral in de winterperiode bestaat het gevaar dat teveel wordt gedoseerd. Het gewas is dan extra gevoelig. Bovendien is het lichtniveau beperkend en meestal niet de CO_2-concentratie.
Te hoge CO_2-niveaus (soms al 950 dpm) kunnen leiden tot een „onzichtbare" schade in de vorm van groeireductie. Het positieve effect van CO_2 wordt dan gedeeltelijk ongedaan gemaakt door neven-effecten. Dit wordt veroorzaakt door gedeeltelijke sluiting van de huidmondjes. Daardoor vermindert de verdamping en ontstaat een gevoelig gewas.
Er bestaat altijd een risico dat bij CO_2-dosering uit de ketel schadelijke gassen (NO_x) de kas inkomen. Bij niet te overmatige dosering is dit risico niet erg groot.
Met het oog op het voorgaande kan het beste een maximaal CO_2-niveau worden aangehouden van 900 dpm. Bij jonge, gevoelige planten – vooral in de winter – kan voor de veiligheid beter een maximaal niveau van 700 dpm worden gehanteerd.
Bij heteluchtteelten komen zeer hoge CO_2-concentraties voor. Hieraan moet meer aandacht worden besteed.
CO_2 dosering is ook later in het voorjaar en in de zomer zeer zinvol. Getracht zou moeten worden de ketel zo lang mogelijk aan de gang te houden, bijvoorbeeld met een minimum buis, mits dit geen schade aan het gewas toebrengt.
Nog beter is het een warmte-opslagtank aan te schaffen. Dit is in veel gevallen een rendabele investering. De opslag van warmte biedt vanaf het voorjaar tot in de herfst mogelijkheden de CO_2-dosering te verbeteren.
Bij gebruik van een warmte-opslagtank moet de beperkte capaciteit zo goed mogelijk worden benut. Het is beter de tank niet „vol" te stoken in enkele uren van de ochtend, maar dit te spreiden over de hele dag. Op deze wijze kunnen de planten ook tijdens de meest lichte uren van de dag profiteren van extra CO_2.

Berekenen CO_2-verbruik en efficiëntie

Het doseren van CO_2 hoort sinds een aantal jaren bij de belangrijke teeltmaatregelen bij de teelt onder glas. Hier en daar kan echter nog wel wat worden verbeterd aan de installatie en/of aan de manier van doseren. Om veranderingen in het doseren van CO_2 mogelijk te maken, moet eerst een en ander bekend zijn over te verwachten effecten en kosten. Voor dit laatste is het onder andere nodig dat het verbruik aan CO_2 – door de planten en als gevolg van ventilatieverliezen – en dus ook de efficiëntie van het doseren van CO_2 kan worden berekend.



Zoeken naar de beste verhouding tussen CO_2-opname en verbruik

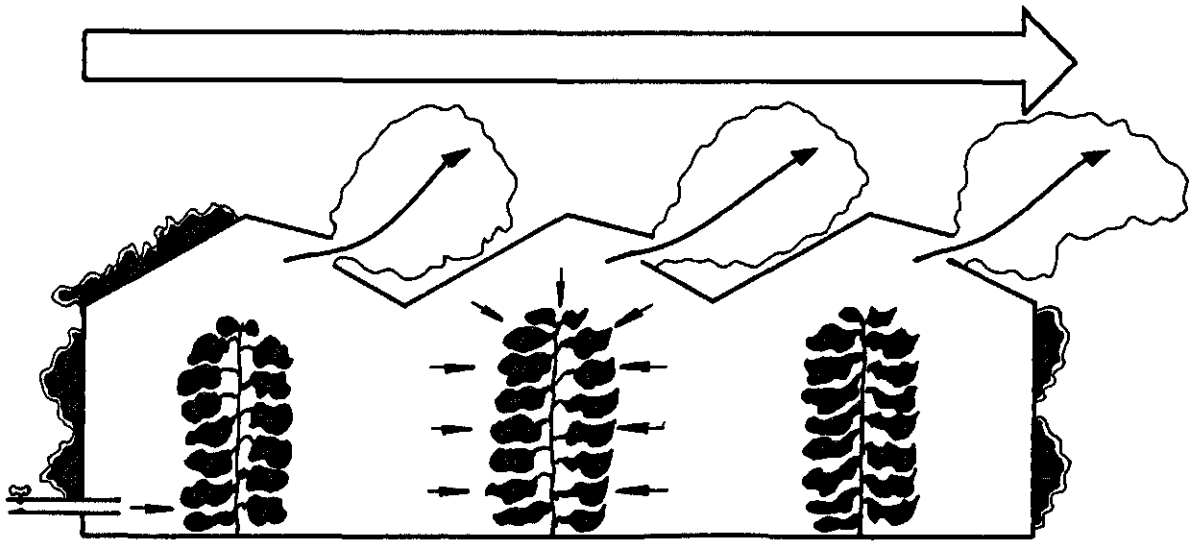
Om inzicht te krijgen in de behoefte aan CO_2 zijn twee factoren belangrijk (**figuur 1**). Hoeveel CO_2 is nodig om de ventilatieverliezen te compenseren en hoeveel CO_2 wordt door het gewas opgenomen?
Allereerst geven we berekeningen van de ventilatieverliezen. Hierbij wordt rekening gehouden met twee situaties. Op de eerste plaats de situatie waarbij in de kas een hoger CO_2-niveau heerst dan buiten. Ventileren betekent in dat geval altijd een verlies van CO_2. In de tweede situatie heerst in de kas een lager CO_2-niveau dan buiten. Door ventilatie komt dan juist CO_2 de kas binnen.
Voor het maken van berekeningen is het nodig dat het ventilatievoud bekend is. Dit is een getal dat aangeeft hoeveel keer per uur de kaslucht wordt ververst. Uit metingen die in Venlo-kassen op het proefstation in Naaldwijk werden verricht, is een en ander bekend over ventilatie. Aangezien de Venlo-kas een algemeen voorkomend type kas is, kunnen deze gegevens over de ventilatie als voorbeeld voor berekeningen worden gebruikt.
In de vorm van een formule kan ventilatie als volgt worden beschreven: $V = 0{,}09 \times W \times (R + L)$. Hierin is V het ventilatievoud (luchtverversing in keer per uur), W is de windsnelheid in meters per seconde, R is de raamopening in procenten (100% was een kier van 66 cm aan één kant bij tweeruits halve luchtramen) en L is de lekheid van de kas. Deze varieert van 0,5 voor een moderne, dichte kas tot ongeveer 2 (of nog veel meer) voor een oudere kas. De formule is wel vereenvoudigd en bij grotere raamopeningen daarom niet zonder meer geldig. Het ventilatievoud is dan namelijk kleiner dan wat deze formule aangeeft.
Met de formule kan op ieder moment de ventilatie worden berekend als de windsnelheid en de raamopening bekend zijn. We lichten dit met een voorbeeld toe. Als de windsnelheid 4 m per sec bedraagt, de raamopening 10% is en de lekheid 1,4, bedraagt het ventilatievoud $0{,}09 \times 4 \times (10 + 1{,}4) = 4{,}1$ keer per uur. Dit kan worden omgerekend naar luchtverversing per m^2 kasoppervlak door het laatste getal te vermenigvuldigen met de gemiddelde kashoogte. In een kas die 2,55 m hoog is, wordt dus $4{,}1 \times 2{,}55 = 10{,}5$ m^3 lucht per m^2 kas per uur uitgewisseld.

Verlies van CO_2 door ventilatie

De hoeveelheid CO_2 die wordt uitgewisseld met de buitenlucht, kan worden berekend als het ventilatievoud en de CO_2-concentratie in de kas en buiten bekend zijn. De berekening gaat als volgt: CO_2-verlies = ventilatievoud × kashoogte × CO_2-verschil × 0.0018. Het getal 0,0018 is voor het omrekenen van dpm naar kilogram CO_2. Het CO_2-verschil is het verschil in de CO_2-concentratie tussen binnen en buiten. Als in de kas bijvoorbeeld 500 dpm heerst en buiten 340 dpm, wordt de uitwisseling van CO_2 in de voorbeeld-kas: $4{,}1 \times 2{,}55 \times (500 - 340) \times 0{,}0018 = 3{,}0$ gram CO_2 per m^2 per uur. Als in de kas bijvoorbeeld 1.000 dpm CO_2 zou zijn, zou het verlies aan CO_2 12,4 gram per m^2 per uur zijn.

De hoeveelheid CO_2 die het gewas opneemt, loopt uiteen van 0 tot meer dan 7 gram CO_2 per m^2 per uur, afhankelijk van licht, CO_2-gehalte in de kas en conditie van het gewas

In het geval de CO_2-concentratie in de kas lager is dan buiten – bijvoorbeeld 250 dpm – wordt de berekening als volgt: CO_2-uitwisseling = $4{,}1 \times 2{,}55 \times (250 - 340) \times 0{,}0018 = -1{,}7$ gram CO_2 per m^2 per uur. Het negatieve getal (−1,7) dat hieruit komt, duidt erop dat er geen CO_2-verlies is, maar dat juist CO_2 van buiten naar binnen stroomt. Hoe lager de concentratie in de kas is, des te groter is de instroming van CO_2. Nu zeggen deze getallen op zich niet zoveel. Ze moeten worden vergeleken met de hoeveelheden CO_2 die de planten opnemen en de hoeveelheden die via het rookgas beschikbaar zijn. Zolang er evenveel CO_2 binnen komt als verdwijnt, blijft de CO_2-concentratie constant. In het voorbeeld



Figuur 1. Het totale verbruik aan CO_2 bestaat uit de hoeveelheid die door de planten wordt opgenomen en dat wat door ventilatie verdwijnt. De verhouding tussen opname door de planten en het totale verbruik is een maat voor de efficiëntie

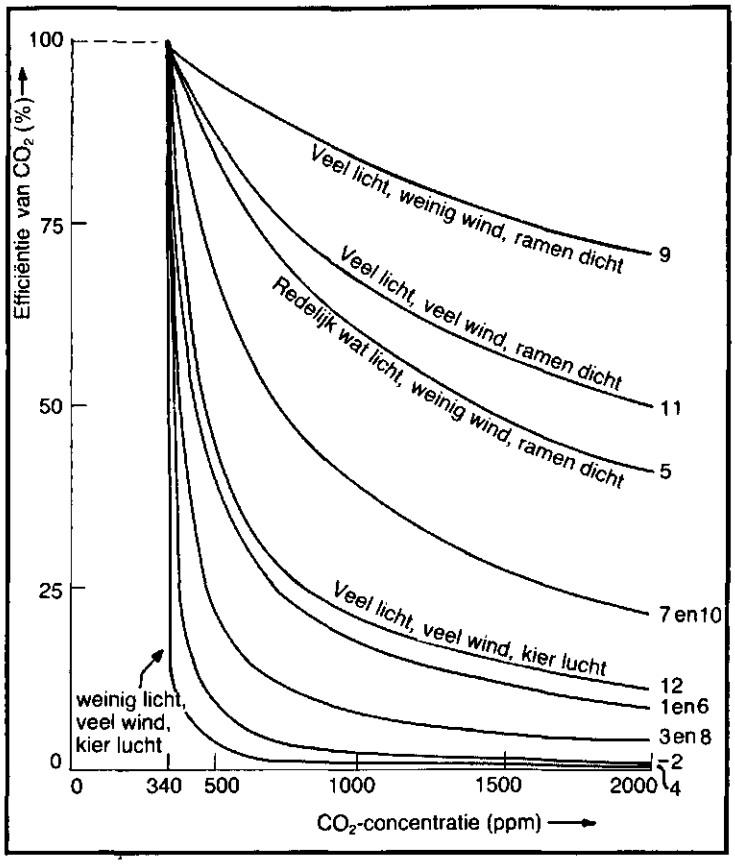
met een CO_2-niveau van 250 dpm geldt dus: Als de planten precies 1,7 gram per m² per uur opnemen en er stroomt 1,7 gram per m² per uur naar binnen, blijft het CO_2-niveau op 250 dpm „hangen". Als nu opeens wordt gedoseerd, begint het niveau te stijgen. Als de CO_2-concentratie hoger wordt, nemen de opname van CO_2 door de planten en het CO_2-verlies echter toe tot een nieuw evenwicht is ontstaan.

Opname door de planten

Hoeveel CO_2 door de planten wordt opgenomen, hangt van verschillende factoren af. De voornaamste daarvan zijn het gewas (soort, afmeting, leeftijd, plantafstand), de CO_2-concentratie, het lichtniveau in de kas en overige klimaatfactoren (temperatuur, watervoorziening, luchtvochtigheid).

Op het CABO in Wageningen is een rekenmodel ontwikkeld waarmee de CO_2-opname bij benadering kan worden berekend. De hierboven genoemde factoren moeten dan uiteraard bekend zijn. Daarvoor worden getallen in het rekenmodel ingevoerd.

Als voorbeeld kiezen we een bepaald gewas en wel komkommer met een grootte van 3 m² blad per m² grondoppervlak. Voor de lichtintensiteit en de CO_2-con-



Figuur 2. Resultaten van berekeningen aan de efficiëntie van CO_2-dosering. Een efficiëntie van 60% betekent dat 60% van de CO_2 wordt opgenomen door de planten en dat 40% verloren gaat door lek of ventilatie. De berekeningen zijn gedaan voor verschillende CO_2-concentraties en verschillende omstandigheden

De nummers rechts in de grafiek corresponderen met de hierna volgende omstandigheden:

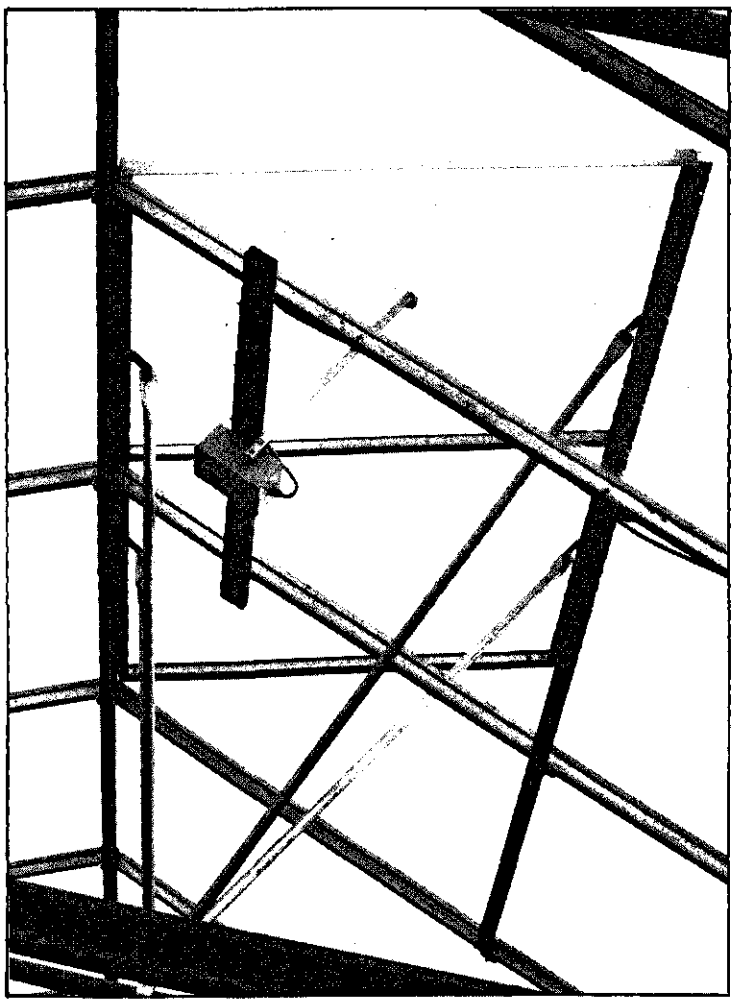
	Lichtintensiteit (W/m²)	Windsnelheid (m/s)	Luchting (%)
1	20	4	0
2	20	4	10
3	20	10	0
4	20	10	10
5	100	4	0
6	100	4	10
7	100	10	0
8	100	10	10
9	400	4	0
10	400	4	10
11	400	10	0
12	400	10	10

centratie zijn verschillende waarden ingevuld. Deze staan vermeld in de **tabel**. In de laatste kolom van die tabel staat de berekende fotosynthese in gram CO_2-opname per m^2 per uur. Uit de resultaten blijkt dat de CO_2-opname sterk kan variëren. De laagste waarden zijn nul of zelfs negatief en dat betekent dat de planten geen CO_2 opnemen, maar juist afgeven. Dit is 's nachts het geval en soms ook overdag bij ongunstige omstandigheden (bijvoorbeeld erg donker weer). Een zeer hoge CO_2-opname – meer dan 5 gram per uur per m^2 – komt bij veel licht en hoge CO_2-concentraties voor, mits de andere klimaatfactoren dan ook in orde zijn. De getallen die we op deze manier berekenen voor de CO_2-opname door planten, kunnen verder worden gebruikt voor het berekenen van het totale CO_2-verbruik en de efficiëntie van dat verbruik.

Efficiëntie verbruik

De totale hoeveelheid CO_2 die in een kas met gewas wordt verbruikt, is de som van het verlies door ventilatie en de opname door de planten. Als voorbeeld nemen we weer de situatie met een windsnelheid van 4 m per sec, een raamopening van 10%, een CO_2-niveau in de kas van 500 dpm en voor de lichtintensiteit veronderstellen we 350 W per m^2. Zoals we hebben gezien komt het verlies aan CO_2 door ventilatie op 3,0 gram per m^2 per uur en de opname door de planten op 5,2 (**tabel**). Het totale verbruik is dus 3,0 + 5,2 = 8,2 gram per m^2 per uur. De verhouding tussen de hoeveelheid die de planten opnemen en het totale verbruik is 5,2 : 8,2 = 0.63 ofwel 63%. Dit percentage kan de efficiëntie van de CO_2-dosering worden genoemd. Het zal duidelijk zijn dat dit percentage van moment tot moment varieert en afhankelijk is van de klimaatomstandigheden. Om hiervan een indruk te krijgen, is in **figuur 2** de CO_2-efficiëntie weergegeven in relatie met het CO_2-niveau, bij een aantal verschillende situaties (verschillende lichtniveaus, raamopeningen en windsnelheden). In deze grafiek is het op het eerste gezicht opvallend dat de efficiëntie 100% bedraagt bij alle CO_2-concentraties beneden het niveau van de buitenlucht (beneden 340 dpm). Dit is eenvoudig in te zien: Zolang er een tekort aan CO_2 is, stroomt CO_2 van buiten naar binnen. Per definitie is er dan geen CO_2-verlies door lek of ventilatie, maar zelfs een toename van de CO_2. Het totale verbruik aan CO_2 bestaat dan alleen uit de hoeveelheid die de planten opnemen: De efficiëntie is daardoor 100% (zolang de CO_2-concentratie in de kas lager is dan buiten de kas).

Boven 340 dpm treden wel altijd lek- en ventilatieverliezen op, waardoor de efficiëntie nooit op 100% zal uitkomen, maar altijd lager is. De efficiëntie is het laagst bij hoge CO_2-niveaus in de kaslucht, omdat de verliezen dan het hoogst oplopen. De efficiëntie is eveneens laag wanneer het hard waait of als wordt gelucht. Verder blijkt ook dat de efficiëntie laag kan zijn als gevolg van een lage lichtintensiteit. De planten nemen dan erg weinig CO_2 op en omdat de ventilatieverliezen hoog blijven, is de efficiëntie laag. In de meest ongunstige situatie (weinig licht, veel wind en veel luchting) verdwijnt bijna alle gedoseerde CO_2 naar buiten en wordt slechts zeer weinig door de planten opgenomen. Overigens is het in die situaties moeilijk een hoog CO_2-niveau te bereiken, omdat daarvoor zeer veel moet worden gedoseerd.



De hoeveelheid CO_2 die wordt uitgewisseld met de buitenlucht, kan worden berekend als het ventilatievoud en de CO_2-concentratie in de kas en buiten bekend zijn

Samenvatting

Om verantwoord beslissingen te kunnen nemen over CO_2-installaties en CO_2-regelingen, is het belangrijk dat men enig inzicht heeft in de hoeveelheden CO_2 die worden verbruikt. Met behulp van een formule voor ventilatie is voorgerekend hoeveel CO_2 naar buiten wordt afgevoerd. Als in de kas een lager CO_2-niveau heerst dan buiten, stroomt CO_2 naar binnen. Ook dit kan worden berekend.

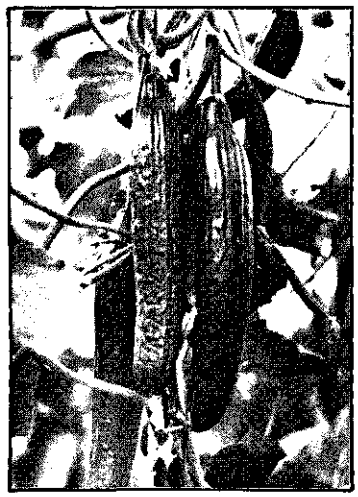
Met behulp van een model kan worden berekend hoeveel CO_2 door de planten wordt opgenomen. Dit is toegelicht met een voorbeeld. De verhouding tussen de hoeveelheid CO_2 die wordt opgenomen en de hoeveelheid die naar buiten wordt afgevoerd, is hierbij de efficiëntie genoemd. Daarbij betekent 100% efficiëntie dat alle gedoseerde CO_2 wordt opgenomen en niets verloren gaat. De efficiëntie varieert van bijna 0% – bij luchtramen open, veel wind en weinig licht – tot 100%. De berekende cijfers voor de efficiëntie zijn in een figuur uitgezet voor een aantal verschillende omstandigheden.

Tabel. CO_2-opname door een volgroeid komkommergewas bij verschillende CO_2-concentraties en lichtniveaus (berekend volgens methode van het CABO). Licht is zichtbaar deel van de straling in W/m^2.

Licht-intensiteit in W/m^2	CO_2-concentratie in dpm	CO_2-opname in gram/m^2/uur
0	340	−0,23
20	200	0,11
20	340	0,20
20	1.000	0,32
100	200	1,14
100	340	1,59
100	1.000	2,31
400	200	3,00
400	340	4,49
400	1.000	7,82

Economisch verantwoord CO_2 doseren

Het doseren van CO_2 in het voorjaar en de zomer stopt meestal zodra er geen warmtevraag meer is. Op de bedrijven waar een warmte-opslagtank staat, wordt meestal nog enige tijd aanvullend gedoseerd, waarbij het CO_2-niveau van de buitenlucht als richtsnoer geldt. Het zou echter zeker de moeite waard zijn in de voorjaars- en zomerperiode hogere waarden na te streven zolang dat tenminste rendabel is. Dat betekent dat er ook tijdens ventileren soms tot boven de 340 dpm zou moeten worden gedoseerd. Althans zolang de kosten van het doseren worden goedgemaakt door de meeropbrengst. We zullen in dit artikel de vraag waar CO_2 vandaan komt of waar een overmaat warmte naar toe moet even buiten beschouwing laten. We nemen met andere woorden aan dat er een zeer grote warmtebuffer is. De vraag is dan tot welk niveau op elk moment moet worden gedoseerd.

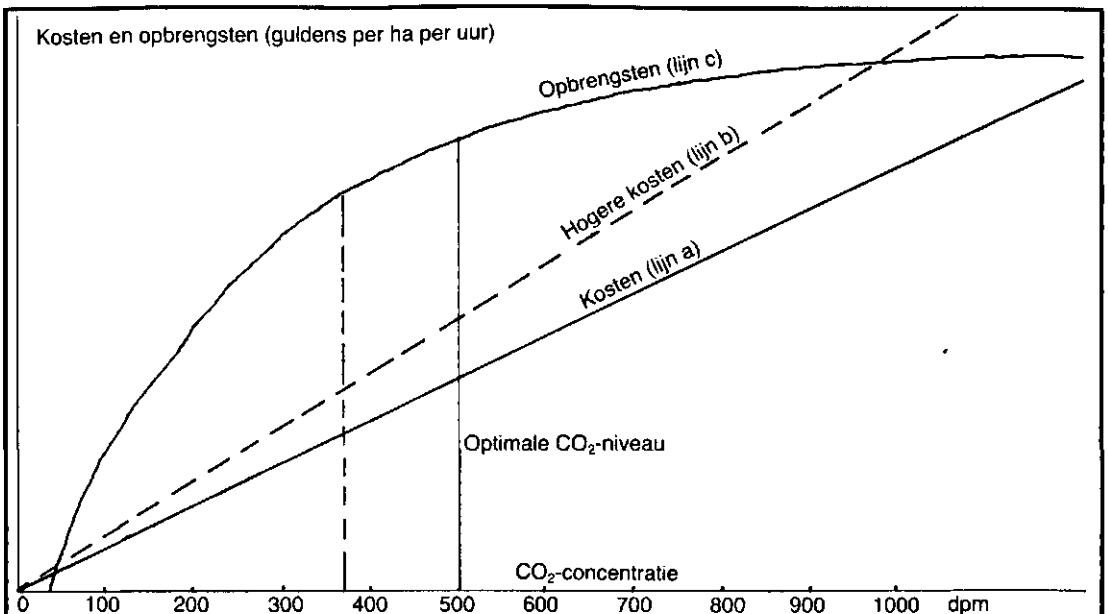


Economisch gezien zou het zeker de moeite waard zijn ook in het voorjaar en de zomer CO_2 te doseren, ook als wordt geventileerd

Economisch gezien zou het zeker de moeite waard zijn om het doseren voort te zetten in de voorjaar en de zomer, ook als wordt geventileerd. Heel vaak weegt de opbrengstverhoging ruimschoots op tegen de kosten. Eigenlijk zou CO_2 moeten worden gedoseerd zolang de kosten van dosering nog worden goedgemaakt door de meerproduktie die deze CO_2 veroorzaakt. Als deze economische afweging steeds zou worden gemaakt, kan worden gesproken van „economische optimalisatie" van de CO_2-dosering. Optimalisatie kan alleen worden uitgevoerd met een speciaal programma in de klimaatcomputer. Hierin zitten onder andere de berekeningen die hierboven beschreven zijn; aan de ene kant de berekening van de kosten van dosering tot een bepaald niveau en aan de andere kant de berekening van de meeropbrengsten. De concentratie waarbij het verschil tussen de kosten en de opbrengsten (de „winst") het grootst is, is de optimale concentratie. Een en ander is toegelicht in **figuur 1.** Zouden we verder gaan dan de optimale concentratie, dan stijgen de kosten meer dan de opbrengsten. Doseren we minder dan tot het optimum, dan laten we een deel van de mogelijke opbrengstverhoging liggen.

Berekeningen

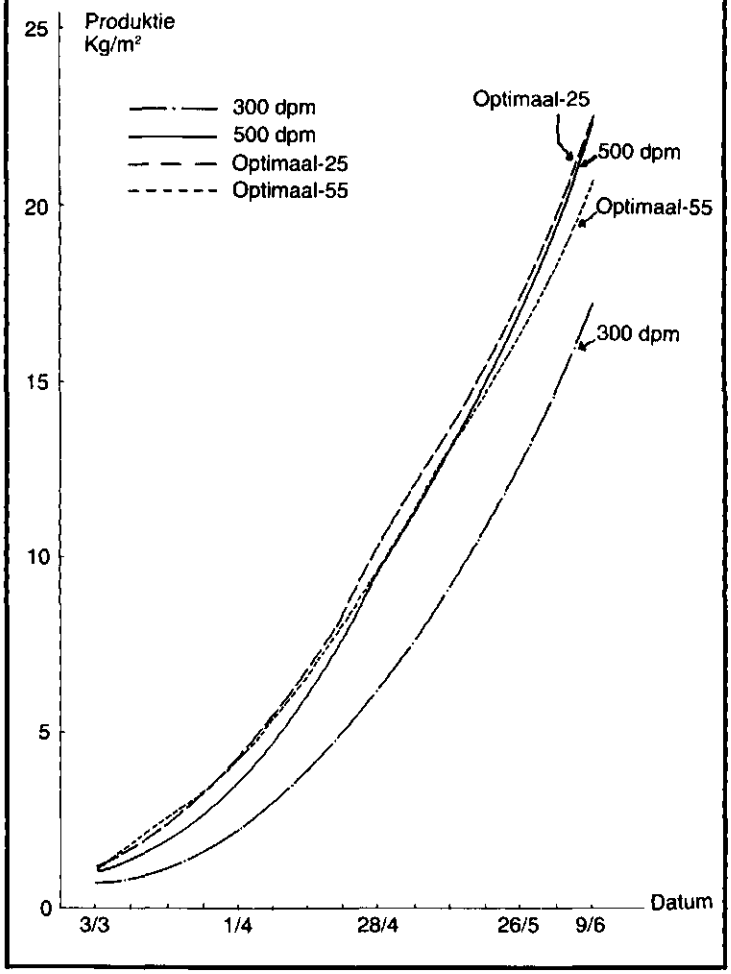
Bij de berekening van de kosten moet rekening worden gehouden met de opening van de luchtramen, de windsnelheid, de kostprijs van CO_2 en nog enkele andere factoren. Bij een grotere raamopening en/of meer wind kost het veel meer om tot bijvoorbeeld 450 dpm te doseren, dan bij gesloten luchtramen en weinig wind. Dit is te zien aan lijn b in figuur 1. Overigens wordt er ook rekening mee gehouden dat, als in de kas een lagere concentratie heerst dan in de buitenlucht, er CO_2 van buiten naar binnen kan komen.
Bij het schatten (door de klimaatcomputer) van de meeropbrengst ten gevolge van het doseren van CO_2, wordt vooral rekening gehouden met de lichtintensiteit en met de afmetingen en



Figuur 1. Het principe van optimalisatie. Lijn a laat zien dat de kosten van doseren hoger zijn naarmate het CO_2-niveau hoger is ingesteld. Een hogere CO_2-concentratie geeft ook een snellere groei en daardoor een hogere produktie (lijn c). Bij te hoge CO_2-concentraties zijn de kosten hoger dan de opbrengsten (allebei zijn uitgedrukt in guldens per ha per uur). Het punt waar het verschil tussen opbrengsten en kosten het grootst is (in dit geval bij 500 dpm), wordt het optimale niveau genoemd. Lijn b is een kostenlijn die aantoont dat de kosten afhankelijk zijn van de omstandigheden. Als de luchtramen openstaan, of als de prijs voor CO_2 hoger is, kost doseren meer geld. Daardoor loopt lijn b steiler dan lijn a. Het optimum ligt lager (in dit geval beneden 400 dpm). Ook de opbrengstlijn is afhankelijk van allerlei omstandigheden

Toekomstig computerprogramma berekent optimaal streefwaarde

Figuur 2. Verloop van de produktie bij vier CO_2-behandelingen (gemiddelde cumulatieve produktie van twee afdelingen)



eigenschappen van het gewas. In de computer wordt op ieder moment een schatting gemaakt van de fotosynthese, dat wil zeggen de CO_2-opname door het gewas. Uit de fotosynthese wordt berekend hoe groot de groeisnelheid is op dat moment en vervolgens wordt hieruit weer berekend hoeveel van deze groei uiteindelijk in het oogstbare produkt terecht komt. Korte tijd later, bijvoorbeeld drie minuten later als het lichtniveau is veranderd, kan de CO_2-opname anders zijn en daardoor ook de groeisnelheid (opbrengstkant) en het CO_2-verbruik (kostenkant). Daarom wordt om de paar minuten de berekening van kosten en opbrengsten opnieuw uitgevoerd.
Nadat berekend is hoeveel kg of stuks oogstbaar produkt de plant zal leveren, moet nog worden geschat hoeveel geld dit zal opbrengen. Daartoe wordt de verwachte produktie vermenigvuldigd met de verwachte veilingprijs. Dit kan een prijsverwachting zijn die de tuinder zelf heeft, of een gemiddelde van de veilingprijs van voorgaande jaren.
De prijsverwachting is helaas een onzekere factor in de totale berekening. De computer zal hiermee toch moeten rekenen en de tuinder zal er mee moeten zien te leven.

Proef met optimalisatie van CO_2-niveau

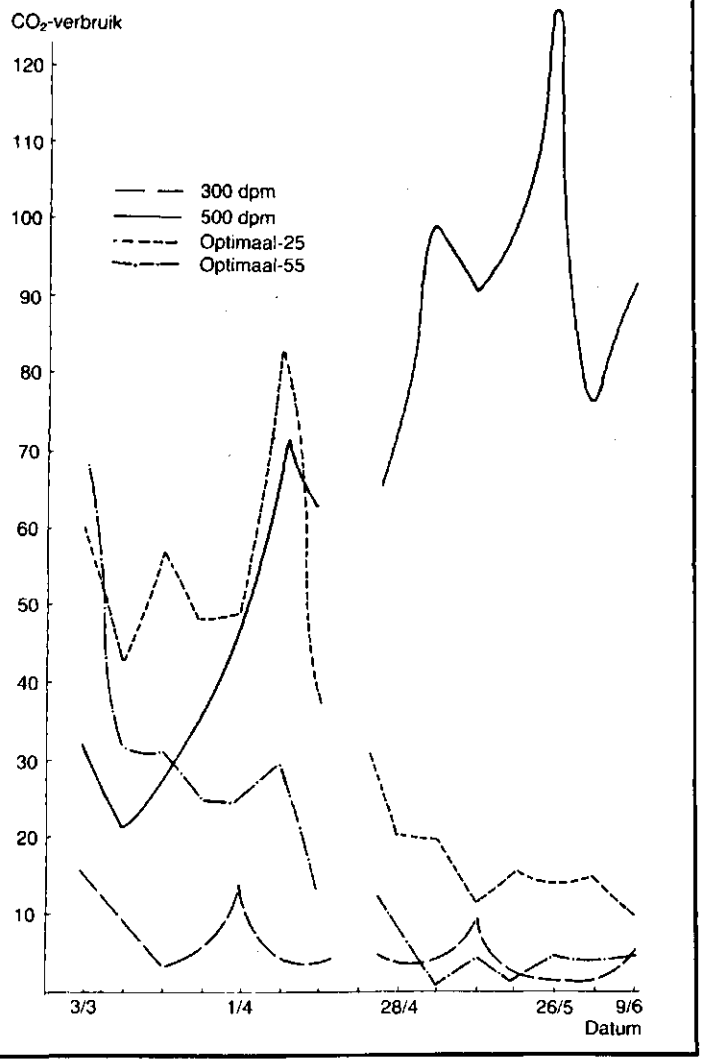
Het hiervoor beschreven principe van optimalisatie van het CO_2-niveau is in 1986 uitgeprobeerd in een proef op het proefstation in Naaldwijk. De proef werd uitgevoerd bij komkommer, maar evengoed had er een ander gewas in de kas kunnen staan. Alleen het gedeelte waarin de produktie en de financiële opbrengst worden berekend, zou moeten worden aangepast voor een ander gewas.
De komkommers werden geplant op 14 januari 1986, de CO_2-dosering startte op 29 januari en de oogst begon op 27 februari. Op 9 juni moest de proef helaas worden beëindigd wegens een verbouwing van de kas. Om praktische redenen werd zuivere CO_2 gedoseerd.
In vier van de acht beschikbare afdelingen draaide het optimalisatie-programma, waarbij werd gedoseerd tot soms 900 dpm. In twee andere afdelingen werd ter vergelijking continu 300 dpm gedoseerd en in weer twee andere continu 500 dpm. In de afdelingen met 300 dpm werd zonodig CO_2 verwijderd met behulp van een chemisch filter. De vier afdelingen met optimalisatie waren opgesplitst in twee verschillende behandelingen, namelijk „optimalisatie met goedkoop CO_2" en „optimalisatie met duur CO_2". Het verschil tussen deze twee behandelingen was dat in het regelprogramma verschillende getallen waren ingevuld voor de kostprijs van CO_2, te weten 25 en 55 cent per kg CO_2. Als CO_2 duur is, zal het programma daar rekening mee houden en automatisch wat zuiniger doseren. Het programma doet dit door een andere kostenlijn in zijn programma te verwerken (figuur 1). De kostenlijn met duur CO_2 (lijn b) loopt steiler dan die voor goedkoop CO_2 (lijn a). De concentratie die economisch optimaal is, zal daarom lager zijn naarmate de kostprijs voor CO_2 hoger is.
De keus van respectievelijk 25 en 55 cent per kg is overigens niet toevallig. Begin 1986 was de prijs van het aardgas 51 cent en daardoor was de prijs van 1 kg CO_2 uit aardgas circa 25 cent (want uit 1 m^3 gas komt bijna 2 kg CO_2 vrij). Het bedrag van 55 cent per kg was gekozen omdat dit min of meer een gemiddelde was van de prijzen die voor zuivere CO_2 moesten worden betaald.

Proefresultaten

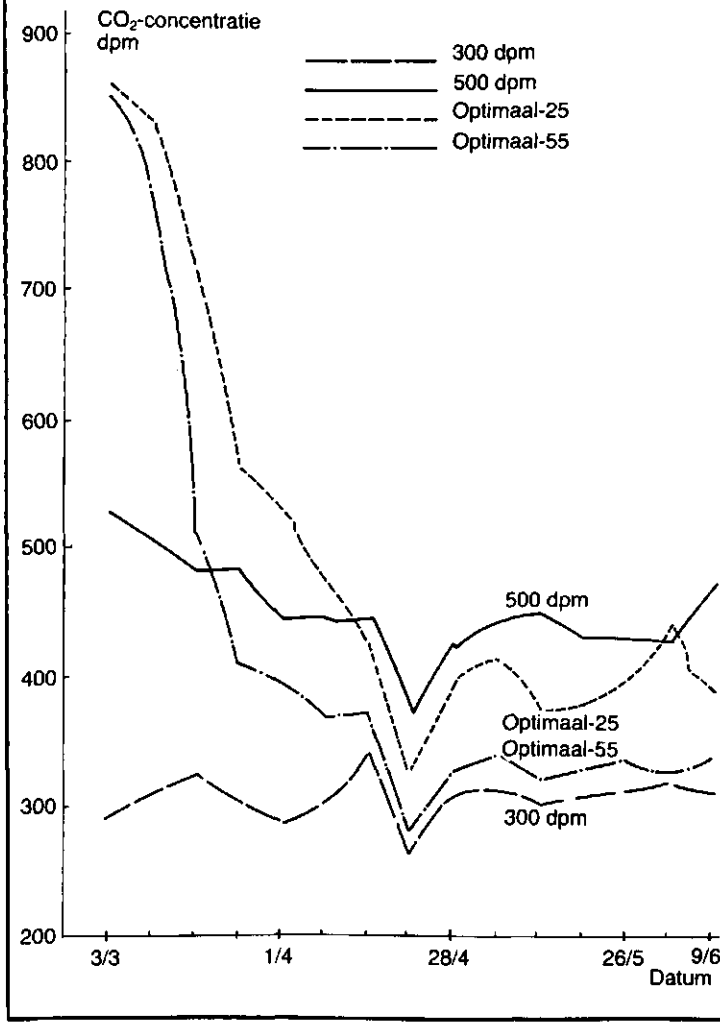
In de proef werd hoofdzakelijk gekeken naar de produktie en naar het CO_2-verbruik bij de verschillende behandelingen. Tevens werd bekeken hoe de CO_2-regeling reageerde op het lichtniveau, de raamopening en de windsnelheid. De produktieresultaten zijn weergegeven in **figuur 2**. Hierin is het verloop van de produktie getekend van de behandelingen 300 en 500 dpm en van optimaal-25 en optimaal-55. In de afdelingen waarin het optimalisatie-programma draaide met de goedkope CO_2 (optimaal-25) werd de hoogste produktie gevonden. In de afdelingen met 500 dpm was de produktie nagenoeg gelijk en in de afdelingen met optimalisatie met duur CO_2 (optimaal-55) was de produktie iets lager. De eindproduktie op 9 juni was circa 11% lager bij optimaal-55 dan bij optimaal-25. In de behandelingen 500 dpm en optimaal-25 was de produktie 30% hoger dan in de afdelingen met 300 dpm.
De kostenkant van de dosering, dat wil zeggen het verbruik aan CO_2, is weergegeven in **figuur 3.** Het is duidelijk dat er veel CO_2 is verbruikt om 500 dpm te handhaven, vooral tijdens ventileren, dus vooral in mei. In de afdelingen met 300 dpm is vrij weinig CO_2 verbruikt. Het CO_2-verbruik in de optimalisatie-behandelingen was veel lager dan in de behandelingen met 500 dpm. Dankzij het optimalisatie-programma is het CO_2-verbruik bij optimaal-25 tot de helft teruggebracht ten opzichte van 500 dpm, terwijl de produktiecijfers elkaar nauwelijks ontlopen.
Het CO_2-verbruik in optimaal-55 was nog veel lager; circa 25% van het verbruik bij 500 dpm, omdat de regeling hier zuiniger doseerde. In optimaal-55 was echter ook de produktie lager dan bij 500 dpm (circa 10% lager). Dit alles betekent dat het optimalisatie-programma in de regelcomputer ervoor zorgt dat met veel minder kosten dezelfde produktie wordt gehaald.

In **figuur 4** is te zien welke CO_2-concentraties zijn gerealiseerd in de verschillende behandelingen. Begin maart – bij vrij veel licht en nog weinig ventilatie – zorgde het optimalisatie-programma ervoor dat flink werd gedoseerd (gemiddeld tot 700 à 850 dpm). In april en mei daalde het gemiddelde CO_2-niveau omdat tot een lager niveau werd geregeld. Optimaal-25 daalde tot circa 360 à 400 dpm en de optimalisatie-behandeling met CO_2 van 55 cent werd soms zelf tot het niveau van de buitenlucht teruggeregeld. CO_2 was dan duidelijk te duur om er ruim mee te doseren. Helaas is door een technische storing een aantal dagen niet gedoseerd, waardoor rond 20 april alle punten erg laag zitten. In figuur 4 laten ook de lijnen van 300 en 500 dpm dat zien.
Het geheim van de CO_2-regeling is dat wordt bekeken op welk moment er het best kan worden gedoseerd. Dat wil zeggen dat wordt bekeken op welk moment de planten er het best op reage-

Figuur 3. Het verloop van het verbruik van CO_2 in de vier behandelingen (de waarden moeten worden gezien als verhoudingsgetallen



Figuur 4. Het verloop van de CO_2-concentratie over het seizoen (gemiddeld over alle lichte uren van de dag en gemiddeld over twee afdelingen)



ren (veel licht) en wanneer het in verhouding niet teveel kost (niet teveel luchtuitwisseling). Gekeken naar het CO_2-verloop over een bepaalde dag, bleek vaak dat vooral 's ochtends – bij veel licht en een kleine raamopening – veel werd gedoseerd. In de behandelingen met optimalisatie met duur CO_2 werd op datzelfde moment gedoseerd tot een wat lagere waarde, bijvoorbeeld 700 dpm. In de loop van de ochtend zakte het CO_2-niveau tot bijvoorbeeld 500 dpm en later op de dag werd door de computer teruggeregeld tot veel lagere niveaus (circa 350 dpm).

Concluderend kan worden gesteld dat deze regeling goede mogelijkheden biedt om dezelfde (hoge) produktie te halen tegen lagere CO_2-kosten.

Samenvatting

Voor een verantwoorde CO_2-dosering, moet rekening worden gehouden met het lichtniveau, de raamopening, de windsnelheid, de kostprijs van CO_2 en de prijs van het produkt.

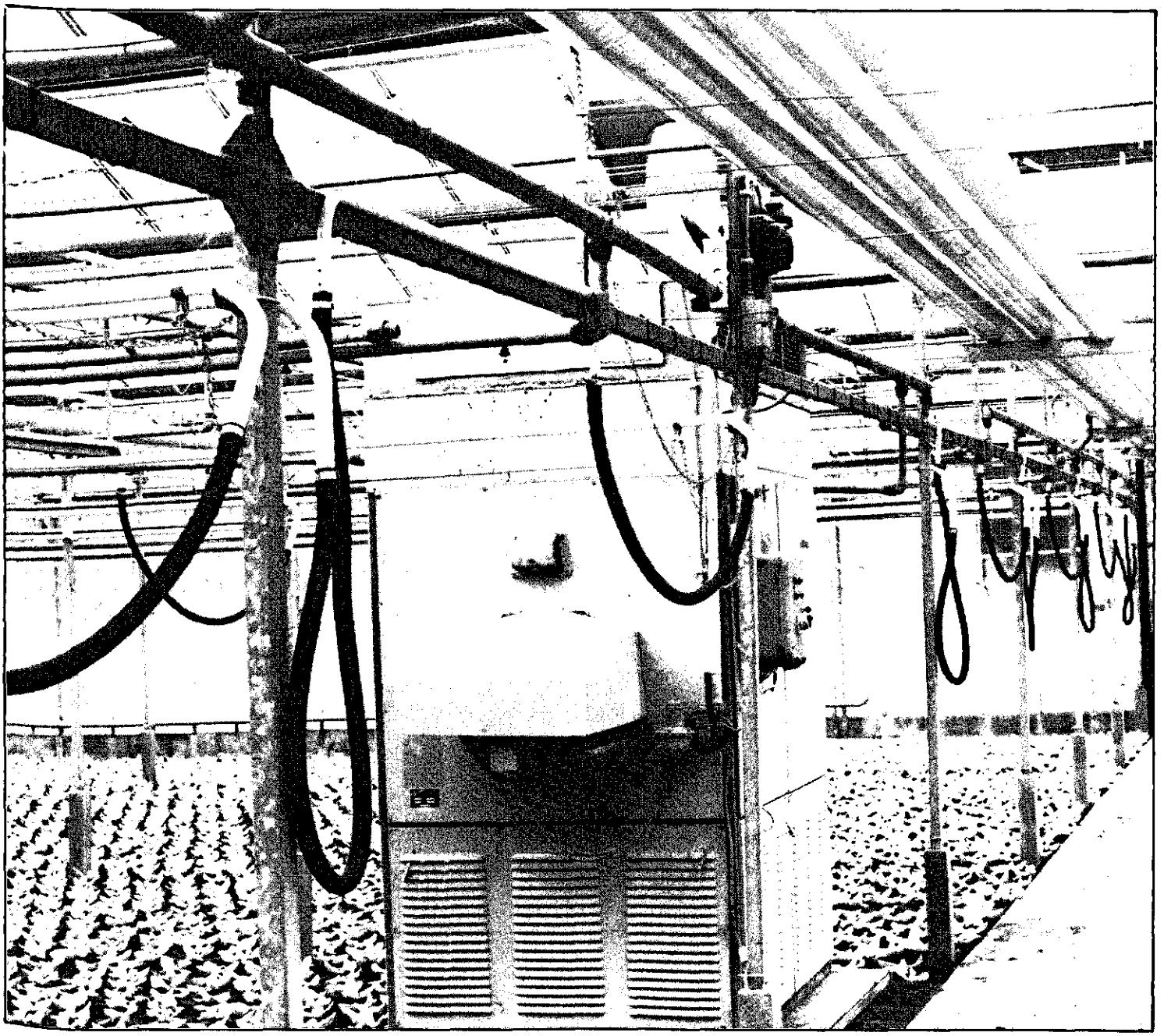
In de toekomst zal de computer wellicht in staat zijn een economische afweging te maken tussen kosten en opbrengsten van het doseren van CO_2. Hierbij wordt dan rekening gehouden met bovengenoemde aspecten. Dit gebeurt in een zogenaamd „optimalisatie-programmma" in de regelcomputer.

In 1986 is een proef genomen met dit optimalisatie-programma. De conclusie was dat het programma ervoor zorgt dat tegen veel lagere CO_2-kosten, toch een hoge produktie wordt bereikt.

De verklaring voor de goede resultaten met het optimalisatieprogramma is dat vooral CO_2 wordt gedoseerd wanneer de plant er het meeste profijt van heeft en wanneer het in verhouding niet al te duur is.

Als over enige tijd het programma voldoende betrouwbaar en algemeen geldig is gebleken, kan het in principe gebruikt gaan worden voor efficiëntere CO_2-dosering.

Bronnen voor CO_2



De opstelling van de kachels moet zodanig worden gekozen dat een gelijkmatige verdeling van de CO_2 wordt verkregen

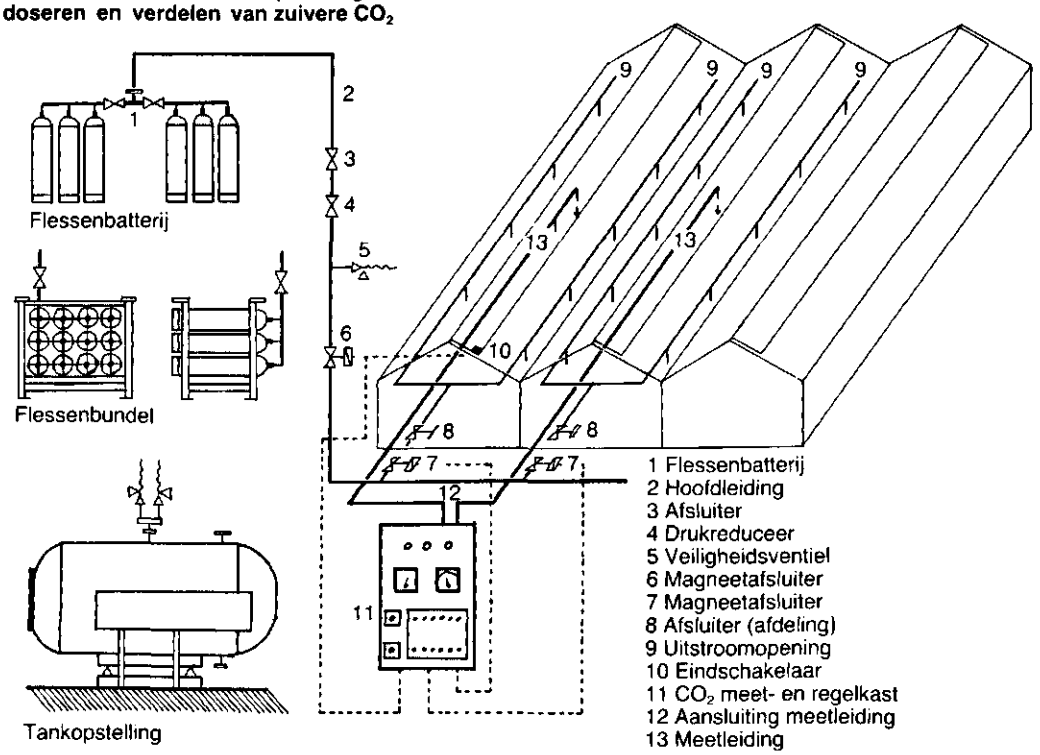
Voor het toedienen van koolzuurgas in kassen kan gebruik worden gemaakt van CO_2-gassen van verschillende herkomsten. Elke bron heeft zijn eigen voor- en nadelen. Van de verschillende mogelijkheden worden hier de belangrijkste aspecten aangegeven.

Wat is CO_2? CO_2 – kooldioxide of ook wel koolzuurgas genoemd – komt van nature in de ons omringende lucht voor tot een gehalte van circa 340 dpm. Chemisch gezien is CO_2 een verbinding bestaande uit een atoom koolstof en twee atomen zuurstof. CO_2 is in de gasfase een kleurloos en reukloos, niet giftig gas dat in water makkelijk oplost (spuitwater). In vaste toestand wordt het koolzuursneeuw of droog ijs genoemd. Het soortelijk gewicht bij 0°C en 1013 mbar bedraagt 1,97 kg per m³. Uit praktische overwegingen kan dus worden gesteld dat 1 liter CO_2 bijna 2 gram weegt en dat 1 kg CO_2 gelijk staat aan 500 liter gas (bij 0°C en 1013 mbar). Het kookpunt ligt op −78,5°C bij 1 bar. CO_2 is ongeveer 1,5 keer zo zwaar als lucht. Door het voortdurend optreden van luchtstromingen in de kas speelt het verschil in gewicht tussen CO_2 en lucht geen rol van betekenis.

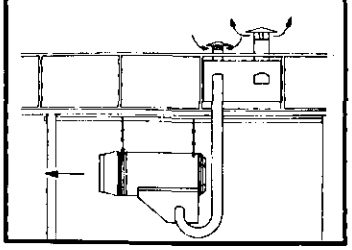
CO_2 wordt langs industriële weg onder andere bereid door verhitting van kalksteen of door kalksteen te laten reageren met zoutzuur. Ook komt CO_2 als bijprodukt vrij bij allerlei chemische produktieprocessen, bijvoorbeeld bij de produktie van kunstmest uit aardgas. Daarna wordt het als vloeistof in zware stalen flessen of tanks geperst en in de

CO_2: zuiver, uit aardgas, propaan of petroleum

Figuur 1. Schematische opstelling voor het doseren en verdelen van zuivere CO_2



Figuur 2. Schets CO_2-kanon in de kas met luchttoevoer van buiten



handel gebracht. Bij 20°C bedraagt de druk van CO_2 in vloeibare vorm ongeveer 73 bar.
Voordelen voor de tuinbouw van de op deze manier verkregen CO_2 zijn:

- Chemisch gezien het meest zuiver (geen gevaar van schadelijke bijgassen).
- Geen gelijktijdige warmteproduktie op het tuinbouwbedrijf, waardoor dosering onafhankelijk is van de warmtebehoefte.
- Goed te verdelen via slangen.
- Dosering relatief eenvoudig te automatiseren.

Een nadeel van dit produkt is de hoge prijs waardoor het weinig wordt toegepast. De opstelling voor het doseren van zuivere CO_2 kan er uit zien zoals in **figuur 1** is geschetst.

CO_2 uit rookgassen

CO_2 wordt gevormd bij de verbranding van alle brandstoffen die het element koolstof bevatten, zoals aardolie en aardgas. Naast CO_2 wordt tevens een hoeveelheid warmte geproduceerd (**tabel 1**).
Bij de keuze van de brandstof spelen verschillende factoren een rol.

De kwaliteit van de brandstof. Hierbij moet vooral worden bedacht dat vele brandstoffen behalve koolwaterstofverbindingen tevens zwavel en andere chemische stoffen bevatten. Wanneer die in te grote hoeveelheden in de rookgassen voorkomen, kunnen ze bij dosering in de kas schade aan de planten toebrengen. Daarom komen naast petroleum slechts propaan en aardgas in aanmerking als grondstof voor de CO_2-produktie. Het zwavelgehalte van petroleum mag niet hoger zijn dan 0,05% (500 dpm). De kwaliteit van de in ons land verkrijgbare petroleum voldoet doorgaans aan deze eis. Het zwavelgehalte van propaan is als regel te verwaarlozen. Het zwavelgehalte van aardgas is eveneens gering en bedraagt gemiddeld circa 3,5 dpm.
De hoeveelheid CO_2 die vrijkomt bij verbranding van een hoeveelheid brandstof. In **tabel 2** is aangegeven hoeveel brandstof nodig is om 1000 liter CO_2 (circa 2 kg CO_2) te produceren. Uit deze tabel volgt bijvoorbeeld dat 1 m^3 aardgas ongeveer 1,8 kg CO_2 geeft.
Aardgas wordt in Nederland het meest gebruikt voor CO_2-produktie op tuinbouwbedrijven, omdat het de volgende voordelen heeft: Het is goedkoop, makkelijk beschikbaar (omdat het toch al op het bedrijf aanwezig is voor verwarming) en schoon.

Hoeveel waterdamp?

Bij het verbranden van aardgas (of petroleum of propaan) ontstaat naast CO_2 en warmte ook waterdamp. De vraag is nu hoeveel waterdamp ontstaat bij verbranding van bijvoorbeeld 25 m^3 aardgas per ha. Per m^3 aardgas komt ongeveer 1.400 gram waterdamp vrij. Per 25 m^3 aardgas is dat dus 35.000 gram waterdamp. Als wordt aangenomen dat een kas circa drie meter hoog is, dan heeft 1 ha kas een inhoud van 30.000 m^3. Per m^3 kaslucht komt dan per uur 35.000 : 30.000 = 1,17 gram waterdamp in de kas. Als een rookgascondensor aanwezig is, wordt dat aanmerkelijk minder. Dan wordt per m^3 aardgas ongeveer 1000 gram waterdamp via de condensor afgevoerd.
In de rookgassen die de kas ingaan, blijft dan nog circa 400 gram waterdamp over per m^3 verbrand aardgas. Per m^3 kaslucht komt dan 0,33 gram water per uur vrij. Dit is zeer weinig in verhouding tot de hoeveelheid waterdamp die door de planten middels verdamping in de lucht wordt gebracht.
In **tabel 3** is aangegeven hoeveel waterdamp er in de kaslucht voorkomt bij verschillende temperaturen en verschillende relatieve vochtigheden. Dit vocht is hoofdzakelijk afkomstig van de verdamping door het gewas. Verder is er altijd wat ventilatie, waardoor de ingebrachte waterdamp weer gedeeltelijk wordt afgevoerd. Bij een gelijkblijvende temperatuur zal de relatieve vochtigheid ten gevolge van CO_2-dosering dus slechts enige procenten stijgen.
Doseren met aardgas of petroleum heeft niet of nauwelijks invloed op de luchtvochtigheid van de kaslucht. Dit geldt in het bijzonder als de rookgassen door een condensor worden geleid.

Apparatuur voor CO_2 uit rookgassen

Bij het doseren van CO_2 uit rookgassen, wordt gebruik gemaakt van verbrandingsapparatuur.

Hierbij kan worden gekozen uit drie typen apparaten. In het algemeen zijn enkele eisen te stellen. De apparatuur moet bijvoorbeeld veilig zijn in het gebruik. Dit houdt in dat geen lekkage van de brandstof mag optreden en dat de brandstoftoevoer automatisch moet stoppen bij vlamstoring om gevaar voor explosie en schadelijke gassen tegen te gaan. De apparatuur moet ook makkelijk zijn in het gebruik. Dit houdt in dat de apparaten makkelijk te bedienen moeten zijn en ook eenvoudig buiten bedrijf moeten kunnen worden gesteld.
Tenslotte moet de apparatuur een voldoende lang „leven" beschoren zijn. De constructie moet voldoende solide zijn en de materiaalkeus moet op het gebruiksdoel zijn afgestemd.
De opstelling van de apparaten moet zodanig zijn dat:

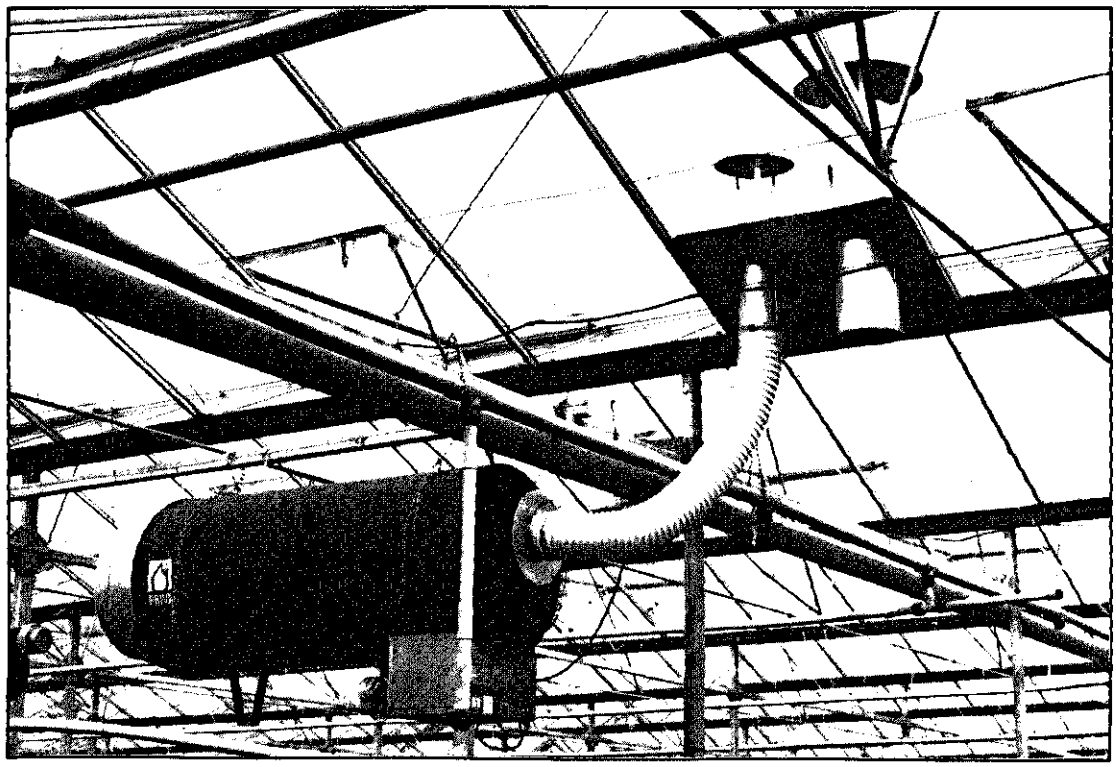
- Een gelijkmatige verdeling van de CO_2 wordt verkregen.
- Zo min mogelijk nuttig grondoppervlak verloren gaat.
- De planten geen hinder ondervinden van een te hoge verbrandingsgas-temperatuur of een te hoge stralingstemperatuur.
- De planten geen hinder ondervinden van te grote luchtsnelheden.
- De apparaten geen hinder ondervinden van sproei- of druipwater.

Hetelucht- of CO_2-kanon

Deze apparaten hebben een open verbrandingskamer waarin olie of gas wordt verbrand. Een ventilator zorgt voor een grote luchtverplaatsing langs de verbrandingskamer. Deze extra luchtverplaatsing is nodig voor een redelijke verdeling van de CO_2 in de teeltruimte en voor een voldoende lage uitblaastemperatuur. Alle verbrandingslucht wordt samen met de extra lucht van de ventilator in de ruimte gebracht. De voor de verbranding benodigde zuurstof wordt of uit de kasruimte onttrokken of aangevoerd van buiten de kas. Door de bouw van dichte kassen is de toevoer van zuurstofrijke (buiten)lucht vaak te gering en is extra aandacht voor zuurstoftoevoer nodig (**figuur 2**).

Staande heteluchtkachel

De grotere staande heteluchtkachels of luchtverhitters verschillen van de heteluchtkanonnen doordat ze een verbrandingskamer hebben die van de kaslucht is afgesloten. De rookgassen worden via een schoorsteen naar buiten afgevoerd. Een aparte ventilator zuigt lucht aan voor de verbranding. Dit kan ofwel lucht uit de kas zijn, ofwel lucht van buiten. Deze relatief koude lucht wordt langs de verbrandingskamer geleid en daar opgewarmd. Voor het doseren van CO_2 wordt in het rookgas-afvoerkanaal een T-stuk geplaatst. Via deze opening, voorzien van een afsluitbare klep, kunnen rookgassen in de teeltruimte worden gebracht. Daar deze toestellen de warmte direct in de kas brengen, is de mogelijkheid voor continu doseren beperkt.
In de praktijk wordt het meest gedoseerd vanuit de centrale verwarmingsketel die zich buiten de teeltruimte bevindt. In het volgende artikel gaan we in op aspecten die met centraal doseren van CO_2 samenhangen.



Een CO_2-kanon met luchttoevoer van buiten

Tabel 1. De produktie van CO_2 en warmte per eenheid brandstof en de verhouding tussen warmte en CO_2-produktie

Brandstof	Eenheid	CO_2-produktie (liters bij 15°C)	Calorische bovenwaarde in kcal	Calorische bovenwaarde in MJ	Verhouding warmte/CO_2-produktie
Petroleum	liter (bij 15°C)	1270	8760	36,676	6,9
Propaan	kg	1630	12000	50,242	7,4
Aardgas	liter (bij 15°C)	730	6120	25,623	8,4
	m^3 (bij 0°C atm. druk)	930	8400	35,169	9,0

Tabel 2. Benodigde hoeveelheid brandstof om 1.000 liter CO_2 (= 1m³ CO_2 = 1,97 kg) te produceren

Brandstof	Benodigde hoeveelheid
Petroleum	0,80 liter
Propaan	0,60 kg
Aardgas	1,20 liter 1,07 m^3

Tabel 3. Het waterdampgehalte van lucht (grammen waterdamp per kg droge lucht) bij verschillende relatieve vochtigheden en temperaturen

RV °C	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
17	4,9	6,1	7,3	8,6	9,8	11,0	12,2
18	5,2	6,5	7,8	9,1	10,4	11,8	12,9
19	5,5	6,9	8,3	9,7	11,1	12,6	13,8
20	5,7	7,4	8,8	10,4	11,9	13,3	14,7
21	6,2	7,8	9,4	11,0	12,6	14,3	15,6

Centraal CO_2 doseren

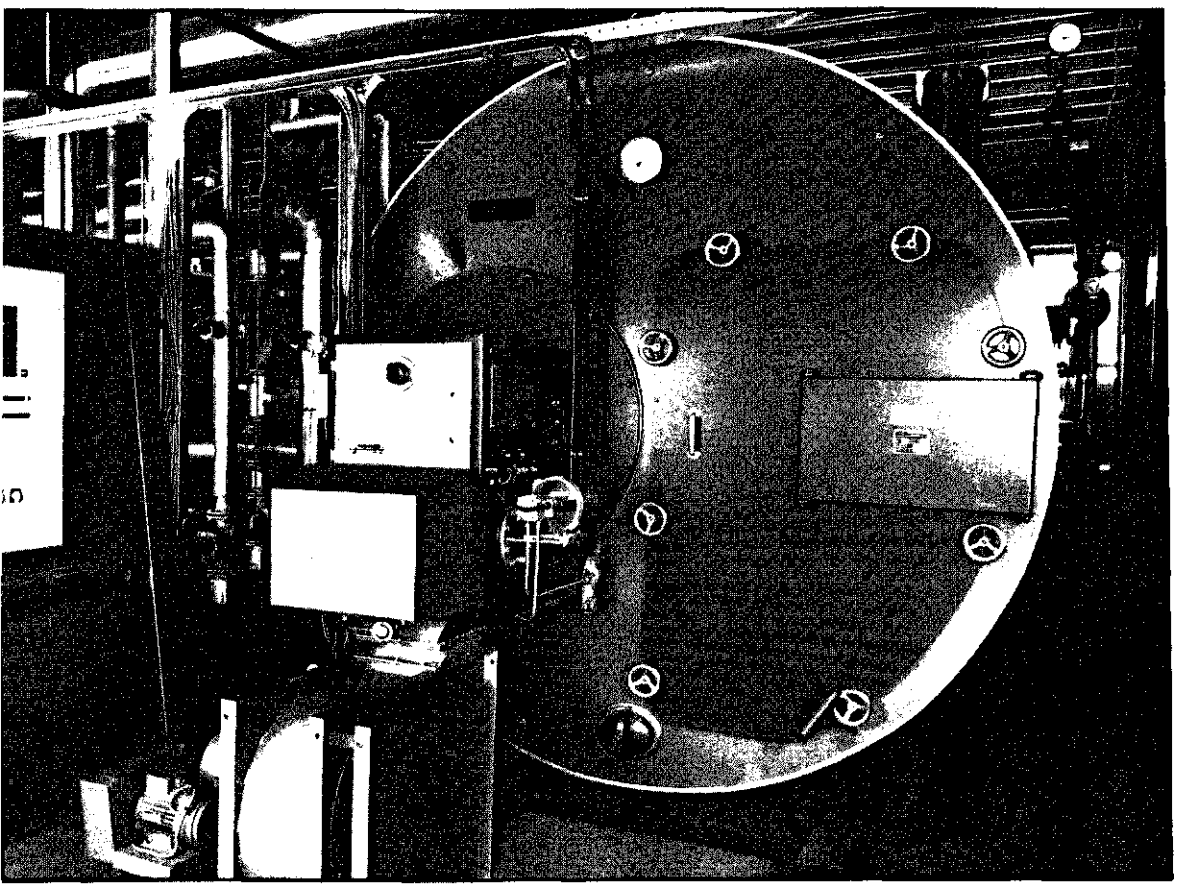
Voor het doseren van CO_2 uit rookgassen kunnen drie typen apparaten worden gebruikt: heteluchtkanonnen, staande heteluchtkachels of de centrale verwarmingsketel. Nadat in het vorige artikel de heteluchtkanonnen en -kachels zijn beschreven, komt in dit artikel de centrale verwarmingsketel aan de orde. Deze methode van CO_2 doseren komt het meest voor in de praktijk en biedt ook een aantal voordelen.

Onder centrale CO_2-dosering wordt verstaan het doseren van verbrandingsgassen uit een ketel die zich buiten de teeltruimte bevindt. Daarbij wordt circa 85% van de opgewekte warmte doorgegeven aan het water in de verwarmingspijpen. Een deel van de rookgassen wordt gebruikt voor CO_2-dosering. Deze rookgassen met de resterende warmte worden gemengd met secundaire lucht, zodat de temperatuur van de gassen daalt tot ongeveer 50°C. Indien de verwarmingsinstallatie is voorzien van een rookgascondensor hoeft minder of geen lucht te worden bijgemengd. Met behulp van een ventilator worden deze gassen in een centrale transportleiding gestuwd. In de teeltruimte worden de gassen via geperforeerde, plastic darmen verspreid.
Centrale CO_2-dosering biedt tegenover het gebruik van CO_2-kanonnen de volgende voordelen:
- Lagere servicekosten.
- Minder storing door betere beveiliging.
- Lagere stroomkosten.
- Geen lawaai van ventilatoren in de kas.
- Geen verbranding van het gewas door plaatselijke oververhitting.
- Geen beschadiging van het gewas door sterke luchtstroming.
- Betere warmteverdeling door het doorgeven van de warmte aan de verwarmingspijpen en hierdoor een beter klimaat.
- Beter rendement van de CO_2 door:

– Het op geringe hoogte vrijkomen van de CO_2, zodat het gas bij de opwaartse beweging eerst langs het gewas strijkt voordat het kan ontsnappen.
– Minder snelle stijging van de vrijkomende CO_2 door de lagere temperatuur.
– Betere verdeling over het kasoppervlak.
– De mogelijkheid om langer door te gaan met het doseren omdat de warmte niet direct bij het gewas komt.
– de mogelijkheid om ook bij hoog opgaande gewassen te doseren.

Branders voor centraal doseren

Bij centrale verwarmingsketels zijn twee typen branders te onderscheiden: de atmosferische brander en de ventilatorbrander.
Atmosferische branders zuigen voor de verbranding lucht van atmosferische druk aan. De verbranding vindt plaats op een zogenaamd branderbed. De gastoevoer wordt geregeld. De luchttoevoer heeft men niet in de hand en wordt niet geregeld. Daarom wordt voor de gasdruk een goedkoop reduceerventiel gebruikt. Met dit ventiel kunnen drukveranderingen in de hoofdleiding van het gas niet geheel worden opgevangen. Dit kan leiden tot onvolledige verbranding. Ook voor de vlambeveiliging is voor een goedkoop instrument gekozen, namelijk een thermokoppel. De beveiliging reageert alleen als er iets hapert aan de vlammen die het koppel verhitten. Valt een deel van het branderbed uit op enige afstand van het koppel, dan wordt de klep niet afgesloten. Verder kan makkelijk vervuiling van het branderbed plaatsvinden, omdat de aangezogen lucht een te geringe snelheid heeft om vuil weg te blazen. Door de keuze van goedkope onderdelen zijn atmosferische branders relatief laag in prijs. Maar door bovenvermelde punten zijn ze erg kwetsbaar.
Ventilatorbranders hebben een andere bouw. De luchthoeveelheid en de gastoevoer worden nauwkeurig geregeld en op elkaar afgestemd. Hiervoor zijn duurdere reduceerventielen ingebouwd, alsmede vlambeveiligingen die een groot deel van de brander bestrijken (ionisatie- en UV-beveiligingen). Door de constructie en de keuze van betere onderdelen zijn ventilatorbranders duidelijk duurder dan atmosferische branders. De kans op onvolledige verbranding is echter aanmerkelijk kleiner.
Het regelbereik van de ventilatorbranders is zodanig dat zij ook voor wisselende hoeveelheden CO_2 te gebruiken zijn. Daarmee vervalt een vermeend voordeel van atmosferische branders, die door hun kleine capaciteit per

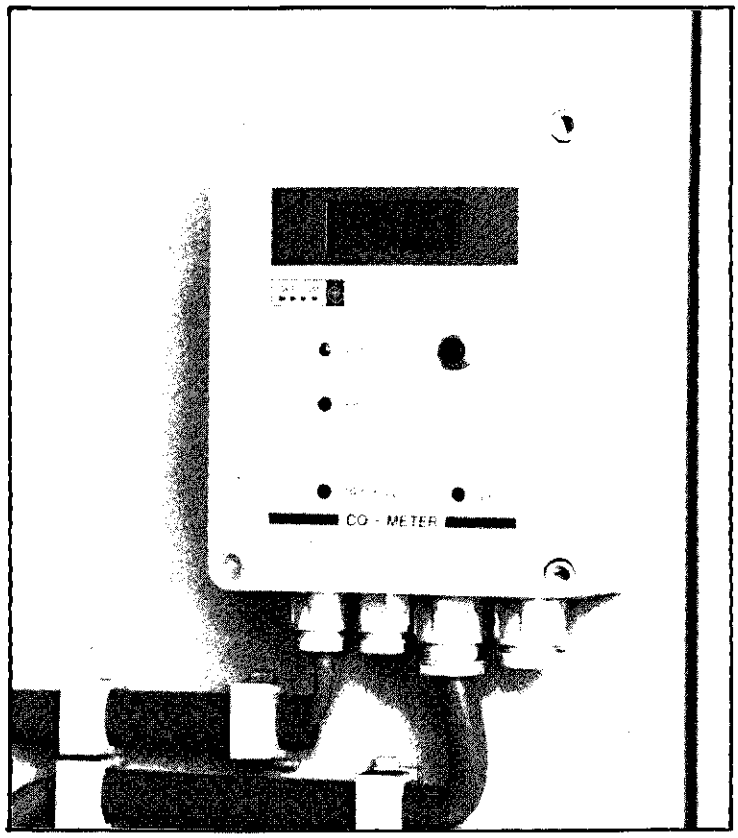


Gasbrander met een voor CO_2-doseren aangepaste branderkop.

eenheid makkelijk tot batterijen van gewenste omvang zijn samen te stellen.

CO_2 doseren uit grote verwarmingsketels

Voor het betrekken van CO_2 uit grote ketels wordt met behulp van een ventilator een hoeveelheid gas uit het rookgaskanaal gehaald. Voor het onttrekken van de rookgassen is een aparte ventilator nodig die geen invloed heeft op de luchtvoorziening bij de branders. Deze ventilator dient tevens om de rookgassen in de hoofdleiding van het CO_2-transportsysteem te stuwen.
De ketels zijn gemaakt voor het leveren van een wisselende hoeveelheid warmte, afhankelijk van het weer. De ketel zal derhalve nu eens met een hogere dan weer met een lagere belasting werken. Meestal wordt CO_2 gedoseerd bij een lage belasting. Dit is een toestand waarbij de verbranding in de regel het slechtst is. Dat wil zeggen dat schadelijke gassen kunnen ontstaan, namelijk CO en ethyleen. Voor het doseren van CO_2 moeten de rookgassen echter bij elke belasting vrij blijven van CO en ethyleen. Wel is het zo dat in de korte perioden met onvolledige verbranding (door het aanslaan van de brander) de CO_2-dosering wordt afgesneden met behulp van een vertragingsrelais.
De beste oplossing is een modulerende brander. Bij dit type brander verloopt de belasting evenredig met de openingstoestand van de gasklep. Na afstelling is de ketel bij elke belasting ook te gebruiken voor CO_2-levering. Overigens is dit wel de duurste oplossing, maar het verlaagt het risico op onvolledige verbranding. Moet de installatie nog worden gebouwd, dan is het verstandig de veiligste oplossing te kiezen.
Branders met een hoog/laag-regeling zijn meestal ongeschikt. Het zijn branders die veelal met minder goede gas- en luchtkleppen zijn uitgerust. Vaak leidt dit tot een vrij grove afstelling, waardoor makkelijk ethyleen en CO kunnen ontstaan. Dikwijls is het regelbereik ook te klein. Dit moet minstens 1 : 4 zijn, maar beter is 1 : 8. In veel gevallen is het echter niet meer dan 1 : 2,5. Dit heeft tot gevolg dat de branders vrij vaak stoppen. Hierdoor wordt de CO_2-produktie telkens gedurende minstens zes minuten onderbroken.



Voor het continu meten van CO is apparatuur in de handel die CO-gehalten tot 50 dpm kan meten. Dit apparaat kost tussen de f 3.000,- en f 4.000,-

Hinderlijke warmte

Om bij een bepaald ventilatievoud een redelijk CO_2-niveau te handhaven (bijvoorbeeld 700 dpm), is soms 5 m^3 aardgas per 1.000 m^2 kas nodig per uur. De regeling van de brander moet dan ongeveer 1 : 8 zijn. Voor veel branders is dit een te grote opgave. In de praktijk zal men in veel gevallen veel minder terug kunnen regelen. Dit betekent dat men uitkomt op een grotere hoeveelheid gas dan nodig is. Dit heeft tot gevolg dat teveel CO_2 wordt geproduceerd. Te hoge CO_2-niveaus in de kas kunnen nadelig zijn.
Ditzelfde geldt voor de warmte die vrij komt. Als overdag nauwelijks warmte gewenst is en wel CO_2 (april en later), dan blijft de ketel toch op een hoge temperatuur en moet de warmte via de buizen in de kas worden afgevoerd. De (kaslucht)temperaturen kunnen dan te hoog worden, waardoor de CO_2-dosering moet worden gestaakt.

CO en ethyleen

Aan het gebruik van verbrandingsapparatuur voor CO_2-dosering zit een risico verbonden. Er kan namelijk altijd onvolledige verbranding optreden waarbij koolmonoxide (CO) en ethyleen ontstaan. Bij het doseren van rookgassen worden ook deze schadelijke gassen in de kas gebracht. CO is schadelijk voor de gezondheid van mensen.
Ethyleen is in zeer kleine hoeveelheden zeer schadelijk voor bijna alle gewassen. Het veroorzaakt verouderingsreacties in de plant, zoals het afvallen van bloemen, verlies van bladeren en zelfs het versneld afrijpen van de vruchten.

Bij het gebruik van kanonnen is het risico van slechte verbranding verdeeld over het aantal opgehangen toestellen. Brandt één van de kachels slecht, dan blijft de schade beperkt tot de planten rondom deze kachel. Bij het centrale systeem ligt het anders. Brandt de ketel slecht, dan zal in principe bij alle planten schade kunnen optreden. De behoefte aan een afdoende beveiliging is hierdoor sterk toegenomen. De beveiliging van een ketel is praktisch gezien echter ook veel beter uit te voeren dan beveiliging van een hele serie toestellen.

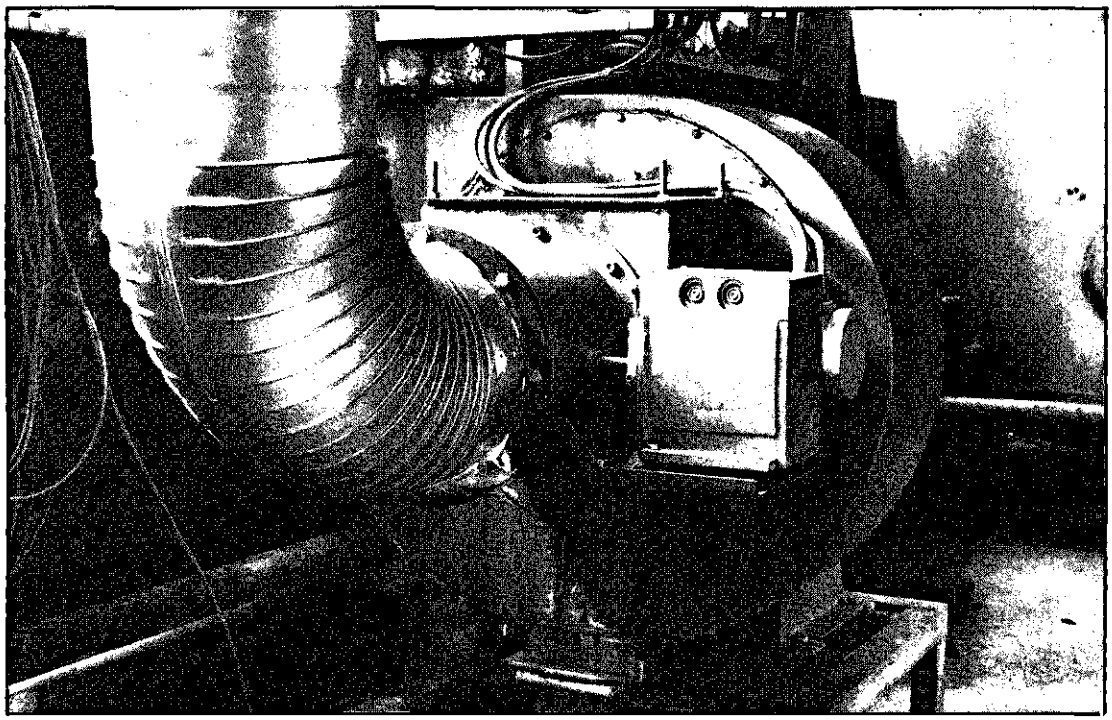
Samenvatting

Om centraal CO_2 te doseren verdient de installatie van een aparte ketel met ventilatorbrander de voorkeur. Ook is het mogelijk een grote verwarmingsinstallatie geschikt te maken door het aanbrengen van een goede, modulerende, lineaire brander. De andere mogelijkheden, aparte ketels met atmosferische branders of gebruik van andere dan bovenvermelde branders voor grote ketelinstallaties, moeten sterk worden ontraden vanwege de kans op onvolledige verbranding. Een goede beveiliging tegen transport van schadelijke rookgassen naar de kas is geen overbodige luxe.

Denk bij terugregelen brander om CO-beveiliging

Installaties voor doseren CO_2

In dit hoofdstuk wordt stil gestaan bij het doseren van CO_2 via de verwarmingsketel. In de praktijk wordt met een grote variatie aan doseerinstallaties voor CO_2 gewerkt.
Zowel in capaciteit als in uitvoering komen daarbij grote verschillen voor. Diverse ontwikkelingen gaven daartoe de afgelopen jaren aanleiding, waarbij alleen maar de introductie van de rookgascondensor hoeft te worden genoemd, evenals de veranderde eisen die aan het gewenste CO_2-niveau in de kas worden gesteld.



Een CO_2-doseerset na de condensor. De uitvoering hiervan is afgestemd op 450 tot 900 m³ rookgasmengsel per ha per uur

In de beginperiode van het stoken met gas zijn zeer veel centrale CO_2-doseerinstallaties geïnstalleerd. Deze installaties zijn berekend op basis van de toen geldende uitgangspunten. Het **rookgasvolume** was bepalend voor de capaciteit van de ventilator en de diameters van de leidingen. Wilde men onder alle omstandigheden kunnen doseren, dan moest rekening worden gehouden met de capaciteit van de brander van de ketel bij maximale belasting.
Het volume wordt groter naarmate de luchtfactor (luchtovermaat bij de verbranding) groter is of de temperatuur hoger is.
De **tabel** geeft een overzicht van het rookgasvolume bij de verschillende luchtfactoren (luchtovermaat) en CO_2-gehalten en temperaturen van de rookgassen.
Een voorbeeld:
Bij een maximale belasting („volast") van de brander worden de volgende cijfers verkregen:
Luchtfactor: 1,1
Rookgastemperatuur na ketel: 200°C.
CO_2-gehalte: 10,5%
Rookgasvolume per m³ gas: 18 m³
Het feit dat de temperatuur van de gassen na de ventilator niet hoger mogen zijn dan 60°C maakte het noodzakelijk om altijd koudere lucht bij te mengen. Om de vereiste temperatuur van 60°C te bereiken, moest bij vollast brandercapaciteit een ongeveer tweemaal zo groot volume lucht worden bijgemengd. Om in het voorbeeld te komen tot een mengsel met een temperatuur van 60°C moet ruim 36 m³ lucht per verstookte m³ aardgas worden bijgemengd. Het mengselvolume wordt dan 54 m³ per m³ verstookt aardgas. In het verleden werden de ventilator en de leidingen voor het doseren van CO_2 hierop berekend.

Afzuigen na condensor

Bij het toepassen van een rookgascondensor is de situatie voor het doseren geheel anders geworden. Wanneer van een rookgascondensor gebruik wordt gemaakt, is het voor het doseren van CO_2 om drie redenen wenselijk de rookgassen achter de condensor door de ventilator te laten aanzuigen. In de eerste plaats bezitten de rookgassen na de condensor immers een veel lagere temperatuur, met als gevolg een kleiner volume. In de tweede plaats hoeft dan weinig of meestal geheel geen lucht meer te worden bijgemengd om onder de vereiste maximale temperatuur van 60°C te blijven. De derde reden is dat dan condensatie heeft plaatsgevonden doordat de rookgassen in de condensor met koude vlakken in contact zijn geweest.
Wanneer de rookgassen vóór de condensor worden afgezogen, bevatten deze gassen uiteraard beduidend meer waterdamp en is de rookgastemperatuur ook hoger. Hierdoor zal zowel de temperatuur als de luchtvochtigheid in de kas enigszins stijgen. Bovendien is het volume van de rookgassen onnodig groot. Bij het toepassen van een rookgascondensor is het dus het beste de rookgassen voor het doseren van CO_2 na de condensor af te zuigen.
Als de temperatuur van de rookgassen in de condensor tot 40°C is gedaald, is – ervan uitgaande dat de luchtfactor 1,1 is – het volume nog maar ongeveer 11 m³ rookgas per m³ verbrand aardgas. Dit betekent dus een vermindering van ongeveer 40% ten opzichte van het volume bij 200°C.
Het zal voor het verlagen van de temperatuur niet meer nodig zijn lucht bij te mengen. Om een redelijk gelijkmatige verdeling in de kasruimte te krijgen, kan het echter toch gewenst zijn het veel kleiner geworden volume aan te vullen met lucht. De 11 m³ rookgas per m³ aardgas is immers slechts 20% van het voorheen gebruikelijke volume van 54 m³ mengsel. Soms is het wenselijk een zelfde volume lucht bij te mengen voor een gelijkmatige verdeling in de kas. Het mengselvolume wordt dan verdubbeld tot ongeveer 22 m³ per m³ aardgas. Als men echter grotere hoeveelheden CO_2 wil doseren, kan in plaats van lucht bij te mengen ook een grotere hoeveelheid rookgas worden gedoseerd.
Wanneer dus een rookgascondensor op een bestaande ketel wordt aangesloten, moet in feite de CO_2-installatie worden veranderd. Er kan immers een andere mengverhouding (rookgas/lucht) worden gecreëerd en het totale te verplaatsen volume wordt kleiner.
Het vervangen van de ventilator biedt daarbij twee voordelen. In de eerste plaats kan bij een nieuwe ventilatorset door de geringere capaciteit en de lagere benodigde druk met een kleiner motorvermogen worden volstaan. Het benodigde vermogen van de ventilator wordt ongeveer een zesde van het vorige vermo-

gen, ervan uitgaande dat de bestaande leidingen van het systeem worden gehandhaafd. Dit heeft een geringer verbruik aan elektrische energie tot gevolg. In de tweede plaats bestaat bij het handhaven van de oude set het gevaar dat de ventilator (met een te grote capaciteit) te veel rookgassen aanzuigt, waardoor het CO_2-gehalte in de teeltruimte te hoog wordt wanneer weinig wordt geventileerd.

Consequenties voor doseerinstallatie

De meeste van de huidige installaties voor het doseren van CO_2 zijn berekend op de norm van 25 à 30 m³ gas per ha per uur. Op grond van onderzoekresultaten wil men echter meer CO_2 toedienen. Of de installatie dan nog bruikbaar is, is vooral afhankelijk van de uitvoering. Gelukkig zijn veel CO_2-sets met enige reserve berekend.

Een CO_2-set wordt als volgt berekend. Uitgegaan wordt van een doseercapaciteit van 30 m³ gas per ha. Bij verbranding van 1 m³ aardgas ontstaat na de condensor ongeveer 15 m³ aan rookgassen bij een luchtfactor van 1,4 en een rookgastemperatuur van 40°C (tabel).

Bij een rookgascondensor moet dus $30 \times 15 = 450$ m³ rookgassen uit de schoorsteen worden onttrokken. Deze hoeveelheid rookgassen is te klein om goed over een ha te kunnen worden verdeeld. Hoe kleiner het volume is, des te moeilijker dit immers goed kan worden verdeeld. Daarom wordt eenzelfde hoeveelheid lucht bijgemengd. De totale hoeveelheid gassen die naar de kas moet worden getransporteerd, is dan 450 m³ rookgassen + 450 m³ lucht = 900 m³ gas. Daarmee staat de benodigde capaciteit van

In de aanzuigbuis van de CO_2-ventilator is een T-stuk geplaatst, dat door middel van een kapje kan worden geregeld. Dit kapje moet zover worden geopend of gesloten dat er een juiste hoeveelheid lucht bijkomt. De CO_2-concentratie na de ventilator is dan ongeveer de helft van de CO_2-concentratie in het rookgaskanaal.

Wanneer de CO_2-set met een T-stuk is uitgevoerd, kan de CO_2-concentratie van de gassen die naar de kas gaan met een truukje worden verhoogd. In de **figuur** zijn twee kleppen getekend. Een klep (klep a) is al aanwezig. Deze is voorgeschreven door het gasbedrijf om recirculatie van rookgassen in het ketelhuis te voorkomen. In het T-stuk kan een extra klep (klep b) worden gemonteerd, die door dezelfde servomotor of door een extra servomotor kan worden bediend. Afhankelijk van de CO_2-concentratie in de kas, kunnen de kleppen zo worden geplaatst dat óf meer rookgassen óf meer lucht wordt bijgemengd. De totale hoeveelheid gassen die naar de kas gaat, blijft gelijk. Als de luchtklep geheel gesloten is, gaat er 900 m³ rookgassen naar de kas. Dit komt overeen met de rookgassen van 60 m³ aardgas per ha. Dit wil zeggen dat de te doseren lucht bijna twee maal zoveel CO_2 bevat als voorheen.

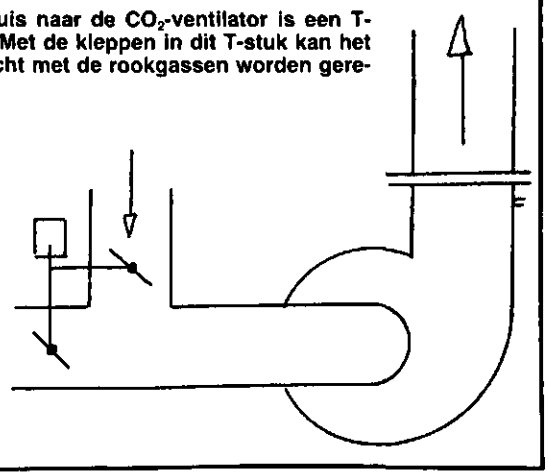
Uit het voorgaande blijkt dat de doseercapaciteit door deze truuk kan worden verdubbeld bij een goed berekende CO_2-installatie.

Wanneer de CO_2-set zonder klep en T-stuk is uitgevoerd, zal de capaciteit van de CO_2-ventilator in de meeste gevallen te klein zijn om meer dan 450 m³ rookgassen naar de kas te verplaatsen. In dat geval is het moeilijk meer CO_2 te doseren. Wanneer de capaciteit van de ventilator niet bekend is, kan bij de leverancier naar de capaciteit worden geïnformeerd.

Hoeveelheid rookgas (in m³) die vrijkomt per m³ verbrand aardgas, bij verschillende rookgastemperaturen en verschillende luchtfactoren. In de tweede kolom staat het bijbehorende CO_2-gehalte. Er is geen rekening gehouden met condensatie van waterdamp

Lucht-factor	CO_2-gehalte droog	Temperatuur rookgas					
		0°C	40°C	60°C	100°C	140°C	200°C
1,0	11,7	9,5	10,9	11,6	13,0	14,4	16,5
1,1	10,5	10,4	11,9	12,7	14,2	15,7	18,0
1,2	10	10,9	12,5	13,3	14,9	16,5	18,9
1,3	9	11,9	13,6	14,5	16,3	18,0	20,6
1,4	8	13,1	15,0	16,0	17,9	19,8	22,7
1,6	7	14,8	17,0	18,1	20,2	22,4	25,6
1,9	6	16,9	19,4	20,6	23,1	25,6	29,3

In de aanzuigbuis naar de CO_2-ventilator is een T-stuk geplaatst. Met de kleppen in dit T-stuk kan het mengen van lucht met de rookgassen worden geregeld



CO2-set bepaalt hoeveel maximaal wordt gedoseerd

Los van het voorgaande zijn er nog enkele verbeteringen aan te brengen aan de CO_2-dosering.

De CO_2-meter in de kas en de meeste CO_2-regelprogramma's werken aan-uit. Dat zal moduleren moeten worden. Hierdoor zal de hoeveelheid te doseren CO_2 niet 'alles of niets' zijn, maar iedere mogelijke hoeveelheid daar tussenin. Het zal ook bekend moeten zijn of de brander wel 60 m³ aardgas per uur levert. Indien dit minder is, zal de brander naar een hogere stand moeten worden gestuurd. Dit zijn kostenverhogende factoren die door een hogere produktie moeten worden terug betaald.

Conclusies

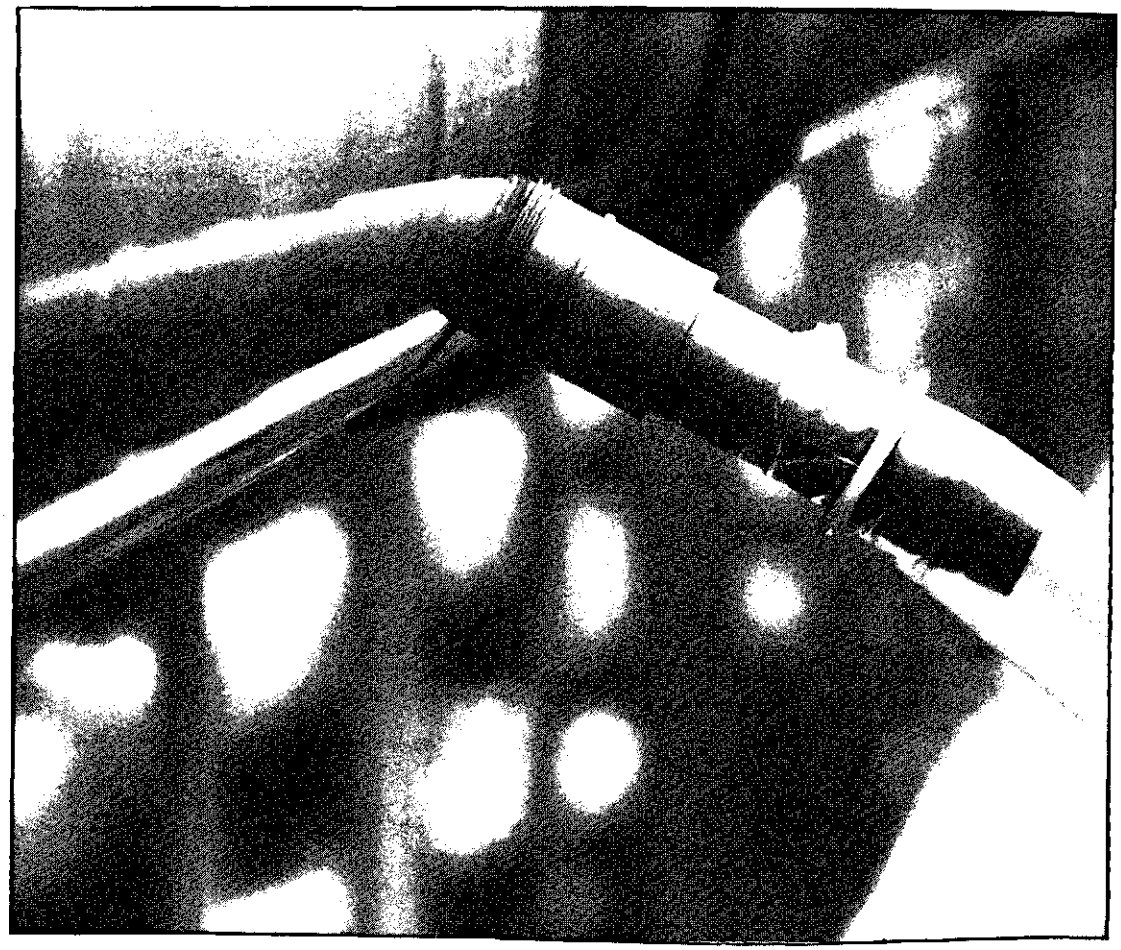
Voor het doseren van CO_2 uit de centrale verwarmingsketel wordt een ventilator(set) gebruikt. Deze moet **achter** de eventueel aanwezige rookgascondensor zijn geïnstalleerd. Rookgassen die niet een condensor passeren, hebben een hoge temperatuur en (daardoor) een groot volume. In verband met de hoge temperatuur is het noodzakelijk veel lucht bij te mengen, waardoor het volume nog meer toeneemt. In verband met het grote volume is dan een grote ventilator nodig. Rookgassen die wel een condensor zijn gepasseerd, hebben een kleiner volume en een lagere temperatuur. Toch is het voor een goede verdeling ook dan gewenst een hoeveelheid lucht bij te mengen. Bij de aanschaf van een rookgascondensor kan een bestaande, grote ventilator worden gewisseld voor een kleinere.

Wanneer men met een bestaande CO_2-installatie meer CO_2 wil doseren dan waarvoor de set is berekend, dan kan dit in sommige gevallen door een extra klep te monteren in het T-stuk voor de luchttoevoer. In plaats van lucht kan dan een extra hoeveelheid rookgas de kas in worden geblazen.

Bij nog te bouwen installaties zou rekening moeten worden gehouden met grotere doseercapaciteiten (rookgas van 60 m³ gas per ha of meer!). De dosering moet moduleren kunnen plaatsvinden.

Verdeling van CO_2

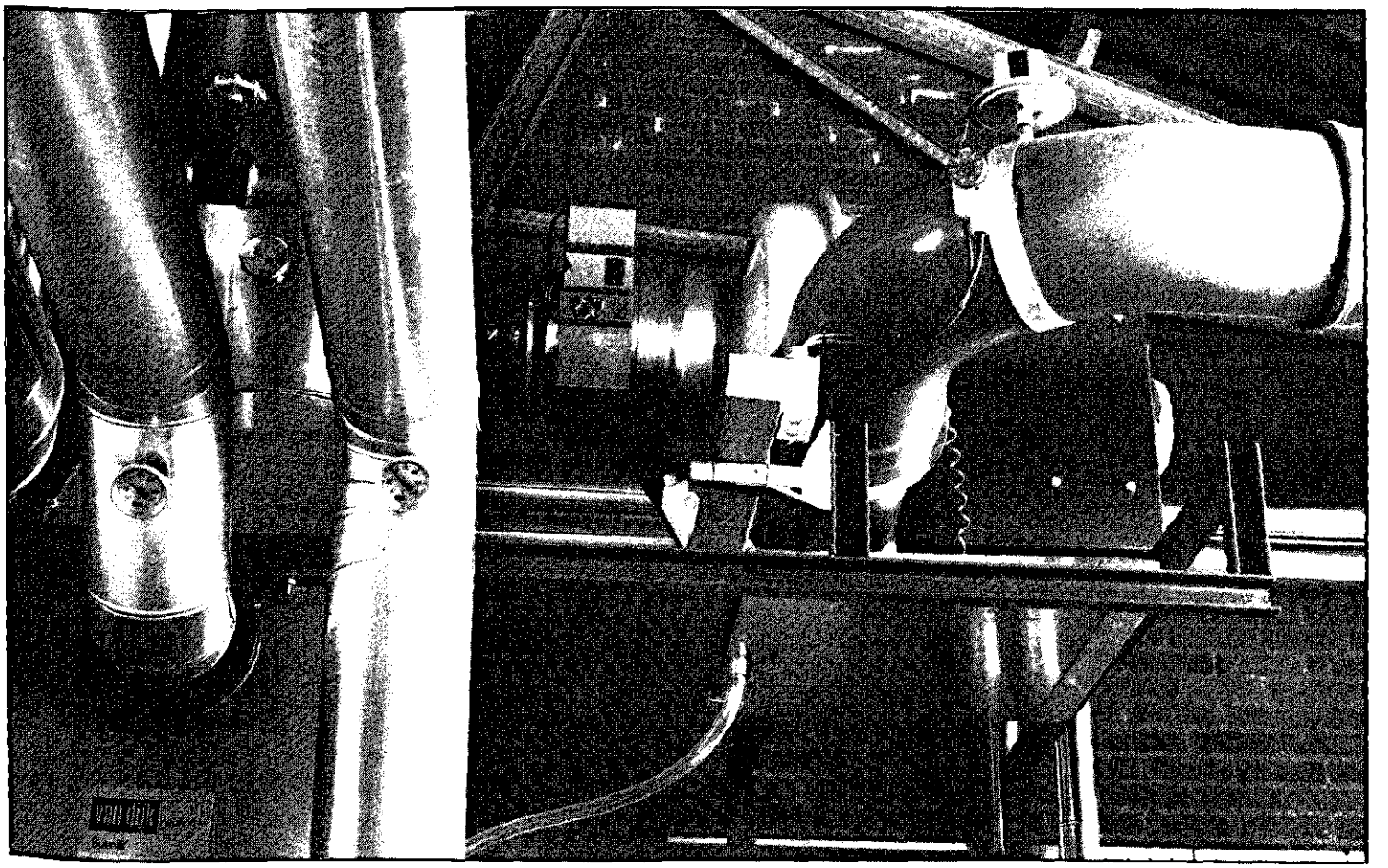
Bij het centraal doseren van CO_2 is een goede verdeling van het rookgas/luchtmengsel van groot belang. In deze bijdrage komen zaken aan de orde die bij aanleg van het verdeelsysteem de nodige aandacht verdienen.
De centrale doseerinstallatie bestaat uit een ventilatorset, transportleidingen, hoofdverdeelleidingen en geperforeerde slurven.
De CO_2 komt in de kas via de perforaties in de slurven. De slurven zijn gekoppeld aan de hoofdverdeelleidingen. Voor het op elkaar afstemmen van de verschillende onderdelen moet eerst bekend zijn hoeveel m^3 rookgassen moeten worden verdeeld.



Stel dat voor een voldoende hoge CO_2-concentratie in de kas per uur per 1000 m^2 kas 5 kg CO_2 nodig is. Dit komt overeen met circa 2,5 m^3 aardgas. Voor een bedrijf met 1 ha glas is dan per uur 25 m^3 aardgas nodig. Het volume van de rookgassen is sterk afhankelijk van de temperatuur, waarop al eerder werd ingegaan. In een tabel werd daarbij aangetoond dat rookgas van 40°C een kleiner volume heeft dan rookgas van bijvoorbeeld 200°C. Bij gebruik van een rookgascondensor worden de rookgassen afgekoeld tot circa 40°C. Bij deze temperatuur is de hoeveelheid rookgas circa 12 m^3 per m^3 verbrand aardgas.
Zonder condensor moet rekening worden gehouden met een rookgastemperatuur van 200°C. Daarbij is het rookgasvolume circa 18 m^3 per m^3 verbrand aardgas. In het laatste geval worden vanwege de hoge temperatuur van het rookgas twee delen lucht bijgemengd. Het totale volume wordt dan 3 x 18 m^3 54 m^3 rookgas per m^3 verbrand aardgas.
Voor 25 m^3 aardgas, nodig voor 1 ha glas, zijn de volumes gas die moeten worden verdeeld dan respectievelijk:
– Met condensor 25 × 12 m^3 = 300 m^3;
– Zonder condensor 25 × 54 m^3 = 1.350 m^3.
Dat heeft verregaande gevolgen. De absolute hoeveelheid CO_2 is in bovenstaande situatie dus gelijk. De concentratie gemeten in de transportleiding verhoudt zich echter door het bijmengen van lucht als ruim 4 : 1.
Nog even terug naar de eerste situatie met een rookgascondensor. Bij de berekening van de unit wordt niet uitgegaan van puur rookgas. Met behulp van een regelbaar T-stuk wordt namelijk omgevingslucht bijgemengd. Dit wordt gedaan omdat de verdeelmogelijkheid in de kas beter is, dit veiliger is, vanwege de wisselende CO_2-concentraties in de schoorsteen en met het oog op de verhoging van de concentratie in de kas.
Daarom wordt in dit rekenvoorbeeld de te tranporteren hoeveelheid rookgas en lucht bij gebruik van een rookgascondensor per ha per uur gesteld op 25 x 12 x 2 = 600 m^3.

Leidingdiameter en aansluitingsopeningen

Nu het volume dat in de kas moet worden gebracht vast staat, kan hiervoor de ventilatorset worden gekozen en de diameter van de transport- en hoofdverdeelleidingen worden bepaald.
Er bestaat, uitgaande van een bepaalde buisdiameter, een direkt verband tussen snelheid en weerstand. De weerstand verhoudt zich bij een gelijke snelheid (bijvoorbeeld 10 meter per seconde.) bij een buisdoorsnede van 300, 150 en 100 mm als bijna 1 : 2 : 4!
Een dergelijke invloed geldt ook voor de uitstroomopeningen van de hoofdverdeelleiding naar de verdeelslurven. De neiging bestaat die openingen te groot te kiezen. Dat is onjuist zeker naarmate de hoofdleidingen langer worden. Soms zijn deze zelfs meer dan 200 meter lang. Per strekkende meter leiding mag maar heel weinig druk worden verloren om achteraan voor een redelijke verdeling nog voldoende druk over te houden. Standaard recepten zijn moeilijk te geven. Er bestaat immmers ook geen standaard bedrijf. Tracht „voorin" zoveel mogelijk druk te sparen door de uitstroomopeningen naar de slurven klein te kiezen. Dit moet het ontsnappen van te veel lucht en rookgassen voorkomen. Een relatief kleine opening met een hoge uitstroomsnelheid kan net zo veel lucht doorlaten als een wat grotere opening met een lagere uitstroomsnelheid.



Zorg dat de benodigde druk door de ventilator kan worden geleverd

Naarmate de diameter van de openingen groter is en naarmate er meer uitstroomopeningen zijn, zal het drukverlies in de verdeelleiding groter zijn. Om dit drukverlies te beperken, wordt het gecompenseerd door gebruik te maken van smoorgaten in de aansluitopeningen. De CO_2-slurven of -darmen worden daartoe vaak met een stukje pvc van 28 tot 32 mm doorsnede op de hoofdverdeelleiding aangesloten.

Voor een goede verdeling zou feitelijk het aantal uitstroomopeningen in de slurven moeten variëren (achter meer dan voor). In de praktijk gebeurt dit niet. Veelal wordt volstaan met het aanbrengen van een pasring in de pvc aansluiting met een vernauwde opening. De verdeling is dan echter niet ideaal. Dit vindt vooral zijn oorzaak in een te groot aantal uitstroomopeningen in de verdeelslurf, vooral als die lang is. Bedenk wel dat de verdeling

Gelijkmatige verdeling: darmen met goed berekende uitstroomopeningen

definitief wordt bepaald door de weerstand in de openingen van de slurven, die als vrije uitblaasopening wordt aangeduid. De vernauwing in de pasring van slurven aan de hoofdverdeelleiding fungeren alleen als druk-compensatoren.

Verdeling via slurven

Vaak zijn er teveel perforaties (uitblaasopeningen) in de slurven aangebracht. Met hoe weinig openingen in principe kan worden volstaan blijkt uit de volgende berekening.

Stel dat een bedrijf met 1 ha glas bestaat uit 32 kappen van 3,20 m bij 100 m. De hoofdverdeelleidingen liggen langs de kopgevels en in iedere kap wordt een slurf geinstalleerd. In totaal gaat het daarbij dus om 64 slurven van 50 meter. Er moet per uur 600 m^3 rookgas worden verdeeld. Per slurf komt dat dus neer op 600 : 64 = 9,4 m^3 (9.400 liter).

De perforaties in de slurven hebben een diameter van 1 mm, wat overeenkomt met een oppervlakte van 0,78 mm^2.

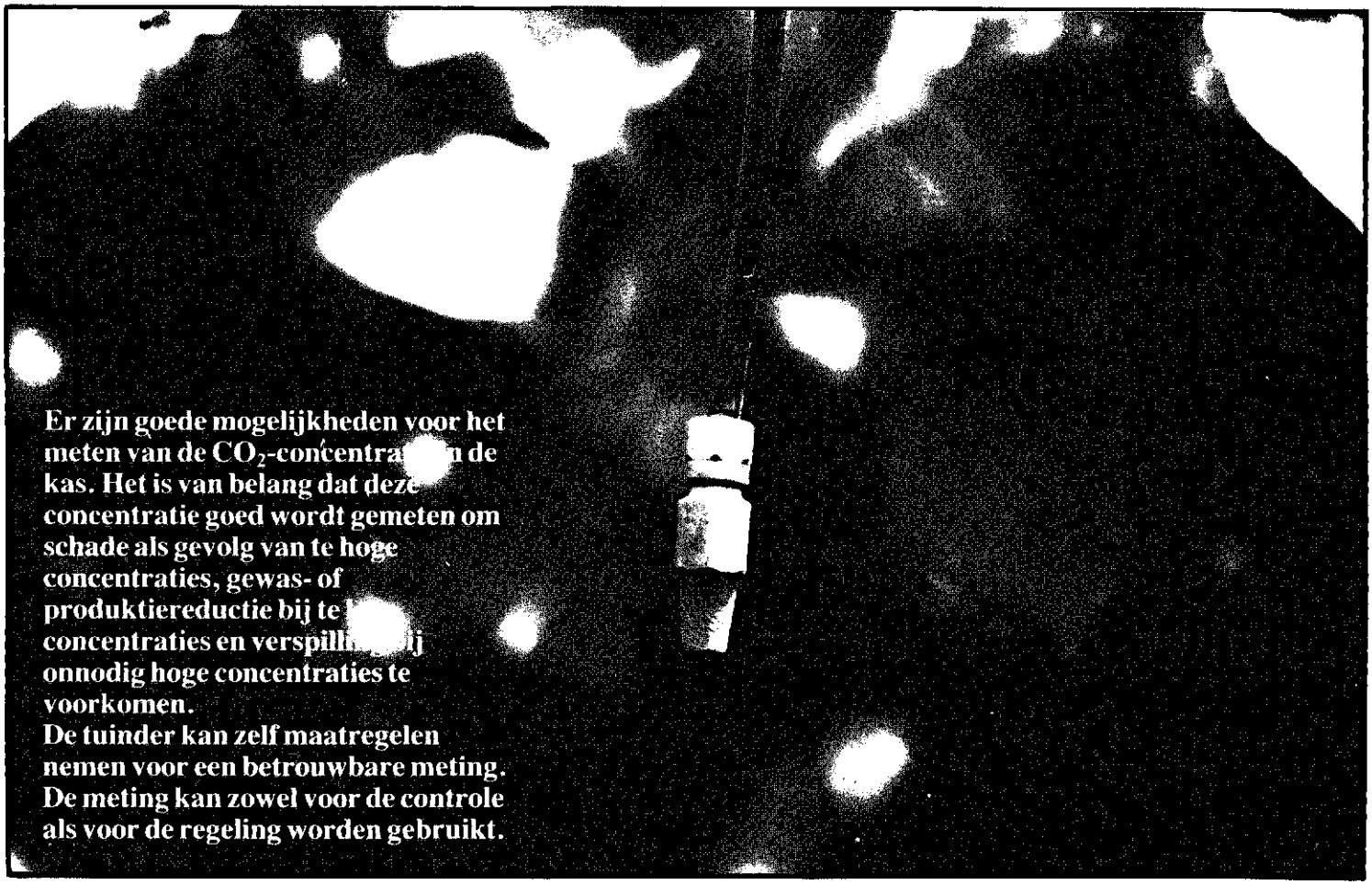
De toelaatbare snelheid in de openingen is 20 m/seconde. Er stroomt dan uit elk gaatje circa 57 liter per uur. Het aantal openingen per slurf van 50 meter moet dan zijn: 9400 : 57 = 165. Per strekkende meter slurf moeten er dus 165 : 50 = 3,3 openingen aanwezig zijn. De snelheid van het gas in de slurf is daarbij aanvankelijk ongeveer 2,5 m per seconde en aan het einde 0. De snelheid is dan helemaal omgezet in druk. De weerstand in de slurfgaatjes is als gevolg van de hoge snelheid vele malen groter dan die in de slurf. Dat komt de verdeling ten goede. Een te groot aantal gaatjes verlaagt de druk in de slurf, wat een averechts effect heeft.

De benodigde druk moet door de ventilator kunnen worden geleverd. Behalve de hoeveelheid lucht die wordt verplaatst, in dit geval 600 m^3 per uur, moet de ventilator ook in staat zijn alle weerstanden tot en met de laatste vernauwde opening te overwinnen.

Samenvatting

Alleen met een juist berekende installatie kan doelmatig CO_2 worden gedoseerd. Een slechte verdeling is veelal te wijten aan te veel of te grote uitstroom openingen. Besteedt hieraan voldoende aandacht bij de aanschaf of vervanging van de installatie.

Het meten van de CO_2-concentratie



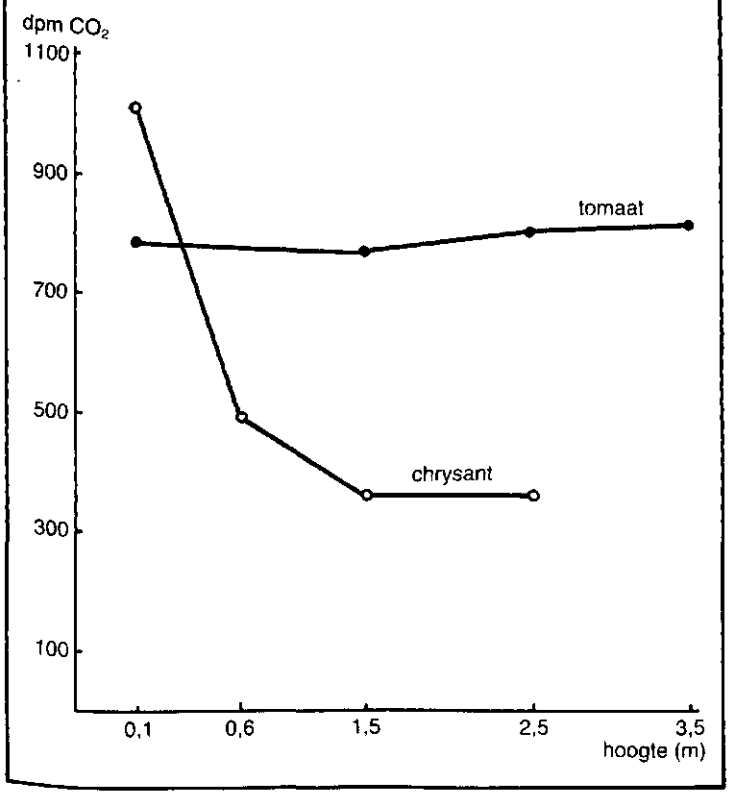
Er zijn goede mogelijkheden voor het meten van de CO_2-concentratie in de kas. Het is van belang dat deze concentratie goed wordt gemeten om schade als gevolg van te hoge concentraties, gewas- of produktiereductie bij te lage concentraties en verspilling bij onnodig hoge concentraties te voorkomen.
De tuinder kan zelf maatregelen nemen voor een betrouwbare meting. De meting kan zowel voor de controle als voor de regeling worden gebruikt.

Een nauwkeurige meting van de CO_2-concentratie is vooral van belang wanneer lage concentraties, bijvoorbeeld van 400 dpm, worden nagestreefd. Dit komt voor op momenten dat geen warmtevraag bestaat en wanneer wordt geventileerd. De nagestreefde waarde ligt dan meestal rond de concentratie van de buitenlucht. Wanneer in dat geval door een meetfout een aanzienlijk hogere waarde dan de concentratie van de buitenlucht wordt gerealiseerd, kan dit leiden tot (te)veel CO_2-verlies naar buiten.
Anderzijds wordt het effect van het doseren van CO_2 sterk beperkt wanneer door een meetfout een aanzienlijk lagere waarde dan de concentratie van de buitenlucht wordt bereikt. Een voldoende nauwkeurige meting is dus belangrijk. Meetfouten van bijvoorbeeld 50 dpm kunnen onder de genoemde omstandigheden al veel invloed hebben. Dergelijke meetfouten zijn in de praktijk echter niet ongewoon.
Wanneer door warmtevraag voldoende CO_2 beschikbaar is en/of wanneer niet wordt geventileerd, zullen meestal hogere concentraties worden nagestreefd, bijvoorbeeld van 700 tot 900 dpm. In die gevallen zal een onnauwkeurigheid van bijvoorbeeld 50 tot 100 dpm niet veel problemen geven. Dan wordt immers gedoseerd tot een globaal maximum CO_2-niveau, dat nog ruim onder de concentratie ligt waarbij kans op gewasschade zou ontstaan.
Een nauwkeurige CO_2-meting is hierbij dus minder belangrijk dan wanneer de CO_2 relatief veel kost en door ventilatie kans op (te) grote CO_2-verliezen bestaat.

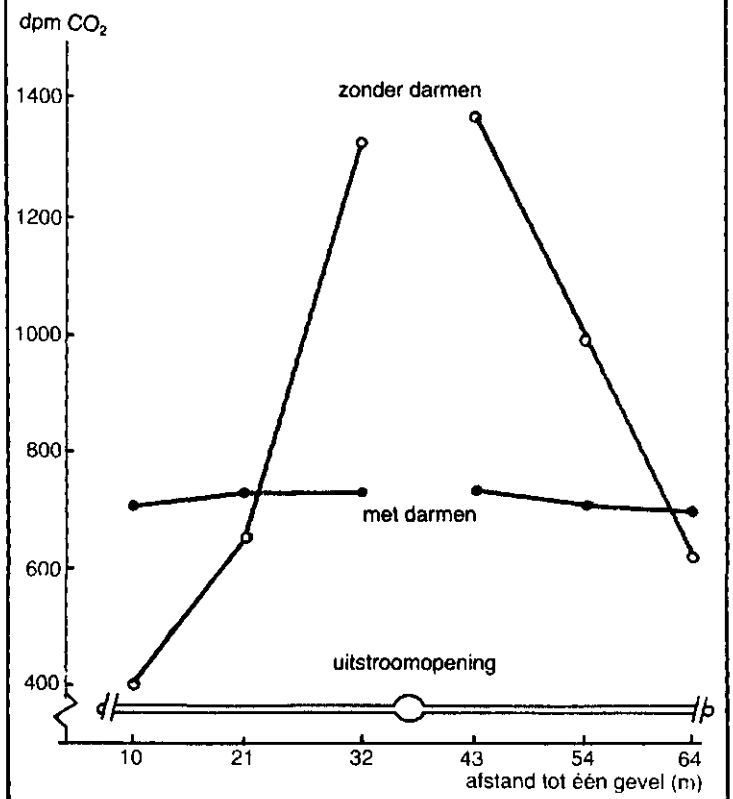
CO_2-meting

Voor het meten en regelen van de CO_2-concentratie worden vooral CO_2-meters van Siemens en Priva gebruikt. De uitvoeringen met een meetbereik van 0 tot 3.000 dpm komen het meest voor. In enkele gevallen komen uitvoeringen voor met een meetbereik van 0 tot 6.000 dpm. Deze worden wel gebruikt voor het bewaken van (tijdelijk) zeer hoge concentraties bij heteluchtverwarming.
De meters/regelaars van Siemens en Priva werken volgens hetzelfde principe en kennen dan ook een aantal overeenkomstige beperkingen, vooral met betrekking tot de nauwkeurigheid van het meten. Deze CO_2-meters/regelaars meten continu op één meetplaats (de aanzuigplaats). Afhankelijk van de gemeten waarde en de door de tuinder ingestelde maximumconcentratie, kunnen ze de CO_2-dosering in- en uitschakelen. Ook kan de gemeten CO_2-concentratie worden doorgegeven aan een klimaatcomputer. Deze schakelt de CO_2-dosering ook afhankelijk van andere factoren, bijvoorbeeld van licht en raamstand, in en uit.
Wanneer men in meer afdelingen afzonderlijk wil meten, wordt gebruik gemaakt van een CO_2-meter en een „CO_2-multiplexer". Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer in die afdelingen verschillende gewassen staan, waarvoor de CO_2 afzonderlijk moet worden geregeld. Deze multiplexer zorgt ervoor dat beurtelings uit de verschillende afdelingen lucht wordt aangezogen. De aangezogen lucht wordt naar de (wel of niet ingebouwde) CO_2-meter/regelaar gevoerd. Vervolgens worden de per afdeling gemeten CO_2-concentraties doorgegeven aan de klimaatcomputer. Deze schakelt dan, eventueel

Figuur 1. Gemeten verticale CO_2-verdeling bij een open gewas (tomaat) en bij een dicht gewas (chrysant). De CO_2 werd onderin met darmen toegevoerd (bij chrysant in de bedden). Bij het tomatengewas bestaat meer verticale luchtstroming, waardoor de verdeling gelijkmatiger wordt



Figuur 2. Gemeten horizontale CO_2-verdeling bij wel en geen gebruik van darmen bij tomaat, afhankelijk van de afstand tot een gevel. Naarmate de gewassen hoger worden, nemen de concentratieverschillen bij het niet gebruiken van darmen toe



per afdeling, de CO_2-dosering in en uit. Bij het ontbreken van een klimaatcomputer kan de CO_2-meter/regelaar zelf de dosering sturen. Dan geldt wel als beperking dat op de meter/regelaar maar één CO_2-streefwaarde kan worden ingesteld, die geldt voor alle afdelingen. Wanneer men toch per afdeling verschillende CO_2-streefwaarden wil instellen, is men aangewezen op de duurdere „computer-multiplexers" (Siemens en Priva). Hierbij kunnen per afdeling onder andere de CO_2-streefwaarden en alarmgrenzen verschillend worden ingesteld. CO_2-multiplexers zijn leverbaar voor twee tot twintig afdelingen. Vooral de kleinere typen worden ook wel „scanners" of „omschakelaars" genoemd.

Verdeling CO_2 in de kas en meetplaats

In een kas kunnen grote verschillen in de CO_2-concentratie voorkomen, zowel horizontaal als verticaal.

De verticale verschillen komen voornamelijk voor bij de dichtere gewassen.

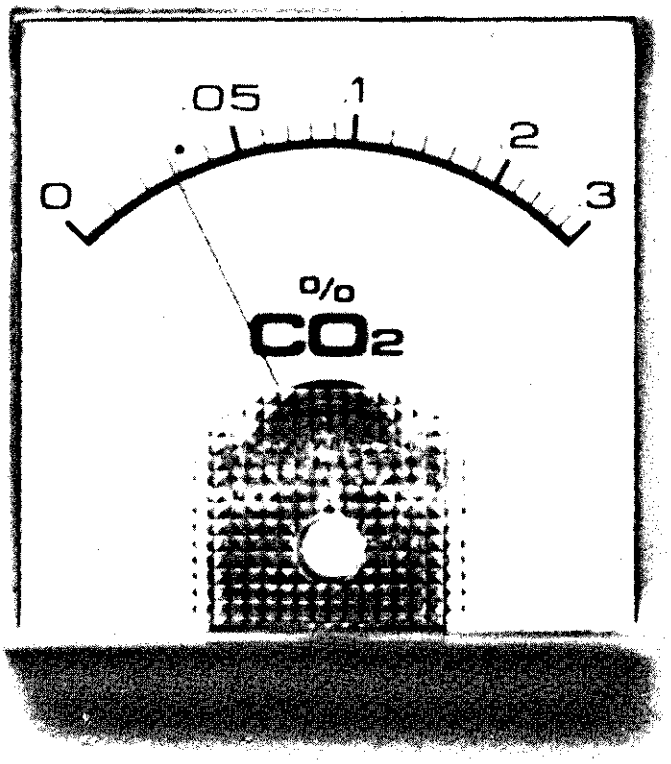
Horizontale verschillen kunnen meer oorzaken hebben, zoals bijvoorbeeld:

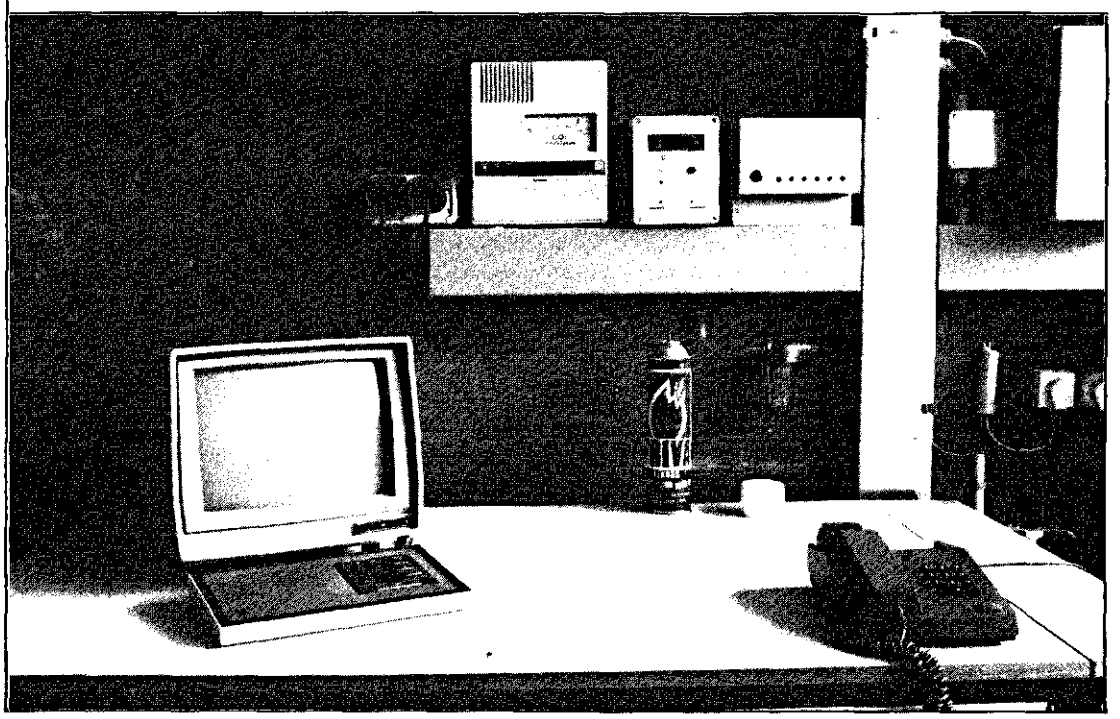
- Een ongelijke dosering. Dit komt vooral voor bij het gebruik van CO_2-kanonnen of heteluchtkachels en bij het gebruik van een centrale toevoerleiding met uitblaasopeningen zonder darmen (**figuur 1 en 2**). Het kan echter ook voorkomen bij het gebruik van (te lange) darmen door te lage druk en te grote of teveel gaatjes.
- Een ongelijkmatige ventilatie. Door een ongelijkmatige ventilatie zal niet overal evenveel CO_2 naar buiten verdwijnen (of van buitenaf worden toegevoerd) (figuur 1 en 2).
- Lekken in de centrale CO_2-leiding.
- „Neerslaande" rookgassen uit de schoorsteen. Wanneer wordt geventileerd, kunnen deze neerslaande rookgassen uit de schoorsteen plaatselijk grote verschillen tot gevolg hebben.

Hoewel verschillen in de CO_2-concentratie niet direct schadelijk hoeven te zijn, moeten ze toch zoveel mogelijk worden voorkomen. Als op sommige plaatsen altijd te weinig CO_2 wordt gedoseerd, leidt dit namelijk tot achterblijven in de groei en produktie. Zo kan een systematische overdosering op andere plaatsen leiden tot CO_2-schade.

Verder is het noodzakelijk dat CO_2-verschillen worden voorkomen om betrouwbare meting mogelijk te maken. Eventuele plaatselijke verschillen in het CO_2-niveau kunnen zelf worden opgemerkt door de CO_2-meter van de wand te nemen en dan met behulp van verlengsnoeren de CO_2-concentratie op verschillende plaatsen te meten. Bij elke meting moet dan worden gewacht tot de meter een stabiele waarde aangeeft. Verschillen bij gebruik van CO_2-kanonnen of heteluchtkachels kunnen dan worden beperkt door ze een betere plaats te geven of door CO_2-kanonnen toe te voegen. Meetverschillen kunnen worden verminderd door tijdens het doseren (extra) recirculatie-ventilatoren te gebruiken. Dit heeft dan wel een verhoogd elektriciteitsverbruik tot gevolg.

Voor het meten van de CO_2-concentratie is het van belang te weten welke verschillen in de kas voorkomen. Bij de keus van de CO_2-streefwaarde en van de CO_2-alarmgrenzen kan dan rekening worden gehouden met het feit dat de concentratie plaatselijk aanzienlijk hoger of lager kan





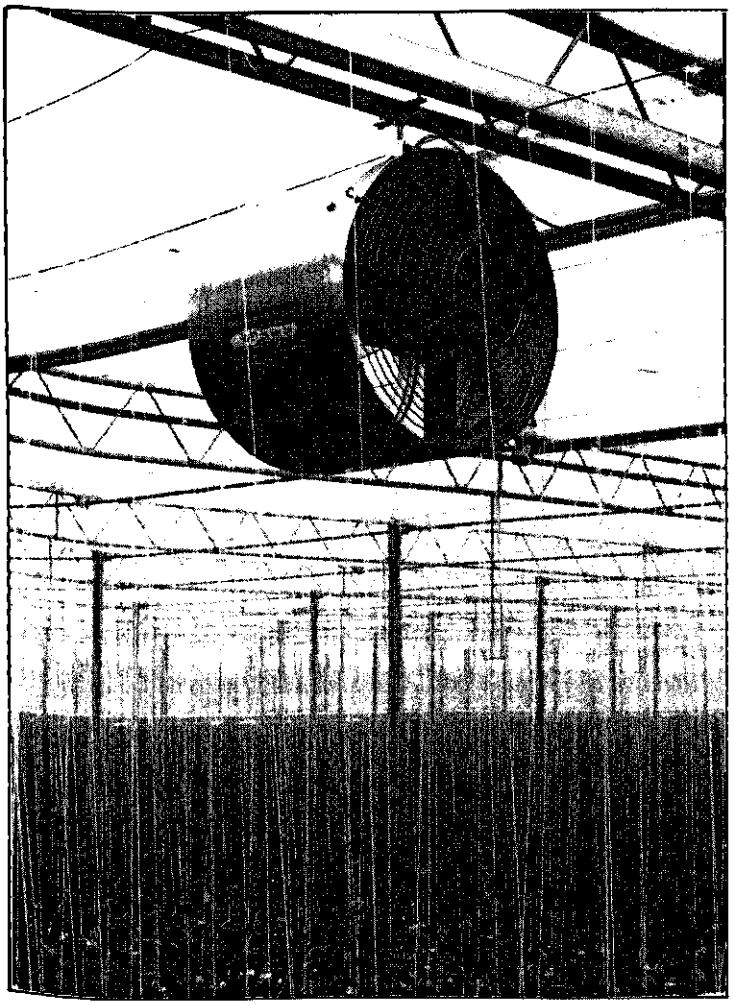
worden dan de (centraal) ingestelde niveaus. Een voor de hand liggende plaats van de meting (de plaats waarop kaslucht moet worden aangezogen) is middenin het gewas.

Nauwkeurigheid CO_2-meting

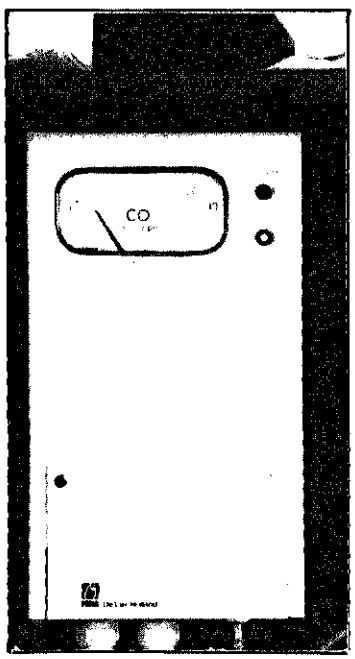
Of de gemeten CO_2-concentratie representatief is voor de werkelijke gemiddelde concentratie in de kas zal dus in de eerste plaats afhankelijk zijn van de plaats van de meting en van de voorkomende verschillen. De betrouwbaarheid van de meting wordt verder bepaald door de nauwkeurigheid van de meter zelf en van de afleesbaarheid.

De onnauwkeurigheid van de meters bestaat uit het geleidelijk verlopen van de meting met de tijd en uit de onnauwkeurigheid van de schaal. Hier komen nog bij de instel- en de schakelnauwkeurigheid wanneer de CO_2-meter/regelaar zelf de CO_2-dosering inschakelt.

Vooral het geleidelijk verlopen van de meting met de tijd kan aanleiding geven tot grote meetfouten. Oplopend tot soms wel 100 dpm in een tijd van zes maanden. Deze meetfout kan worden beperkt door de meter regelmatig op de juiste manier te ijken. Dit wordt nu nog vaak gedaan met buitenlucht, soms ook wel met behulp van de speciaal daarvoor bestemde ijkgassen (Priva). Bij het ijken met buitenlucht wordt verondersteld dat de buitenlucht steeds een constante CO_2-concentratie heeft van ongeveer 340 dpm. In werkelijkheid is dit echter niet het geval. De CO_2-concentratie van de buitenlucht kan afhankelijk van de plaats, de tijd en de windrichting variëren. In gebieden waar geconcentreerd en intensief wordt gestookt zijn wel concentraties gemeten van 700 dpm, afhankelijk van de weersomstandigheden. Daarnaast bestaat ook nog een natuurlijke variatie over het etmaal van enkele tientallen dpm. Hieruit blijkt wel dat de waarde van de buitenlucht geen



Meetverschillen kunnen worden verminderd door tijdens het doseren (extra) recirculatie-ventilatoren te gebruiken



Het is van belang dat de CO_2-concentratie goed wordt gemeten om schade als gevolg van te hoge concentraties en gewas- of produktiereductie bij te lage concentraties te voorkomen

Onderhoud, ijken en goede meetplaats essentieel

betrouwbare ijkwaarde is. In een volgend artikel komt de ijkprocedure en het onderhoud van de CO_2-meter aan de orde.

Waar verder op letten?

Een hoge luchtvochtigheid van de aangezogen lucht kan de nauwkeurigheid bij het meten beïnvloeden. Daarbij bestaat kans op condensatie in de meter. Voorkomen moet worden dat de aangezogen lucht onderweg of bij de meter tot onder het dauwpunt afkoelt. De aanzuigleiding moet dus zo min mogelijk tegen koude constructiedelen worden bevestigd. Condensnat dat dan toch nog ontstaat, vloeit normaliter in de condenspot. Het overlopen van de condenspot leidt tot beschadiging van de meter.

De traagheid van de metingen wordt voor een groot deel bepaald door de lengte en de diameter van de aanzuigslangen, ofwel door de snelheid waarmee de lucht uit de afdelingen naar de meter wordt gezogen. Zolang hierbij de door de leverancier opgegeven normen worden gehanteerd, hoeft dit geen probleem op te leveren. Bij grotere lengten en afwijkende diameters kunnen echter regeltechnische problemen ontstaan. Wanneer bijvoorbeeld acht meetpunten zijn aangesloten en voor elke meting drie minuten nodig zijn, heeft dit tot gevolg dat de meting van een afdeling maar één keer per (8 × 3 =) 24 minuten wordt herhaald. Dit betekent dat de dosering steeds met tussenpozen van 24 minuten worden ingeschakeld, terwijl een maximumconcentratie soms al veel sneller kan worden bereikt. Dit houdt in dat het maximumniveau in de tussentijd kan zijn overschreden. Het is niet wenselijk de meettijd langer dan tien minuten te onderbreken. De pauzes tussen de metingen kunnen echter worden verkort wanneer door alle meetleidingen continu meetlucht wordt aangezogen, zodat bij de meter direct een actueel meetmonster kan worden afgetapt. Daarnaast kunnen de meetleidingen worden verkort door de multiplexer centraal op het bedrijf op te stellen. Het niet op tijd (laten) vervangen of reinigen van de stoffilters kan tot extra traagheid van de meting leiden. Vooral bij het gebruik van een multiplexer („scanner" of „omschakelaar") waarbij de meettijd per meetpunt zo kort mogelijk is ingesteld, kan dit dan leiden tot meetfouten. Om te voorkomen dat het stoffilter te snel vervuilt, moet de aanzuiging van lucht tijdens het toedienen van gewasbeschermingsmiddelen worden uitgeschakeld! Bij normaal gebruik moeten de stoffilters minstens één keer per jaar worden gereinigd of vervangen. Verder moet(en) ook de aansluiting(en) van de slangetjes op de meter/regelaar of op de multiplexer regelmatig worden gecontroleerd om te voorkomen dat „valse lucht" wordt aangezogen.

Samenvatting

Voor een goede CO_2-regeling zijn betrouwbare metingen een vereiste. Dit komt met name tot uiting in perioden waarin lage concentraties worden nagestreefd, bijvoorbeeld bij enige ventilatie. Hier kan door de tuinder zelf veel aan worden gedaan. Door doelmatige inzet van apparatuur zijn betrouwbare metingen mogelijk. Met behulp van verlengsnoeren kan de meter eveneens worden gebruikt voor het vaststellen van concentratieverschillen in de afdeling.

Onderhoud en ijken van CO_2-meters noodzakelijk

Soms bestaat er onduidelijkheid over de manier waarop CO_2-meters moeten worden geijkt. Daarom wordt in dit artikel ingegaan op de ijkprocedure voor de Siemens en de Priva CO_2-meters en het noodzakelijke onderhoud voor een betrouwbare werking van de meter.

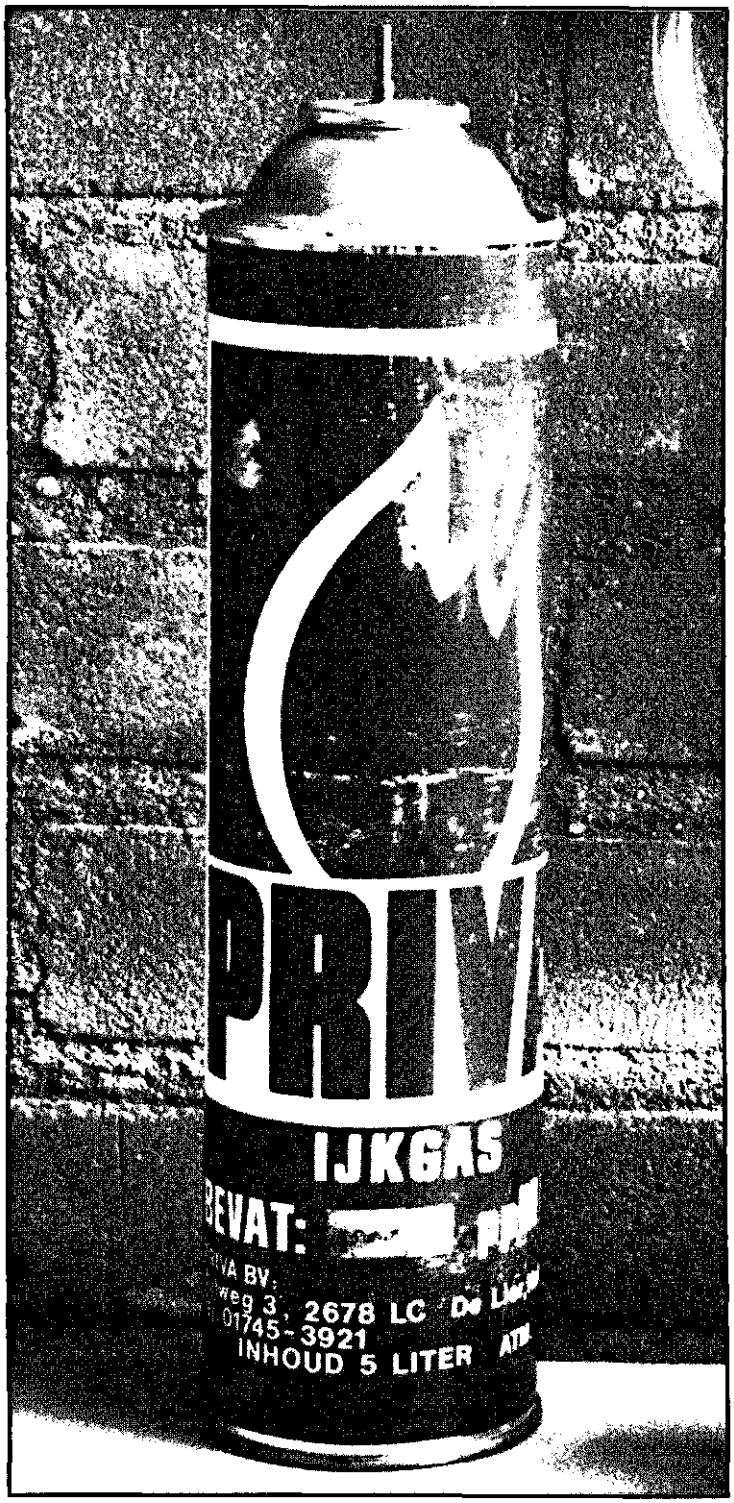
Voor de Priva-concentratiemeter wordt geadviseerd de meter elke drie maanden te ijken. Hierbij moeten de door Priva geleverde ijkgassen worden gebruikt. IJken met buitenlucht wordt afgeraden omdat de buitenluchtconcentratie plaatselijk en tijdelijk sterk kan variëren.
Voor het ijken zijn twee spuitbussen met ijkgas nodig. Een bus met een concentratie van 0 dpm CO_2 voor het ijken van het nulpunt en een bus met een concentratie van circa 2600 dpm CO_2 voor de ijking van een hoog meetpunt. Voor de oudere Priva CO_2-meters met een meetbereik van 0 tot 2000 dpm is ijkgas van met een concentratie van ongeveer 1600 dpm beschikbaar.

Hoe gaat 't een en ander in zijn werk?

- De meter moet minimaal een uur continu in werking zijn voor met de ijking kan worden begonnen. Vervolgens wordt de luchtpomp uitgeschakeld door middel van de schakelaar „pump". De meetslang wordt daarna losgemaakt en de luchtinlaat wordt goed afgesloten met bijvoorbeeld een stukje plakband.
- Eerst wordt nu het nulpunt afgesteld. De bus met het ijkgas van 0 dpm wordt op de „gaschecker-inlaat" aangesloten. Vervolgens wordt het ijkgas de meetkamer van de CO_2-meter ingelaten. Er moet zo lang ijkgas worden ingelaten totdat de aanwijzing niet meer verandert. Dit is na circa 10 tot 20 seconden het geval. Dan kan het ijkgas worden weggenomen en vervolgens kan – met behulp van een fittingschroevendraaier – de wijzer op 0 worden gedraaid met de instelknop „zero".
- Vervolgens wordt de meter geijkt bij een hoger meetpunt. Daartoe wordt de bus ijkgas met een concentratie van 1600 of 2600 dpm op de „gaschecker-inlaat" aangesloten. Ook nu moet het gas worden ingelaten totdat de aanwijzing van de meter niet meer verandert. Dan wordt de ijkbus weggenomen en de instelknop „span" met een fittingschroevendraaier zodanig versteld dat de wijzer exact de CO_2-concentratie aangeeft die op de spuitbus staat vermeld.
- Tenslotte wordt nogmaals het nulpunt afgesteld. Dit is noodzakelijk als de aanwijzing bij het hoge meetpunt moest worden bijgesteld. Nadat dit is gedaan, kan de meetinlaat weer worden geopend en de meetslang worden bevestigd. De meter is nu weer klaar voor gebruik.

Bij het voorafgaande zijn nog enkele punten waar op moet worden gelet. De CO_2-inlaat moet tijdens het ijken goed afgesloten zijn (plakband). Na het wegnemen van de bus(sen) ijkgas van de „gaschecker-inlaat" mag niet te lang worden gewacht met het afstellen van de aanwijzing. Het ijkgas kan namelijk heel geleidelijk weglekken uit de meetkamer van de meter. De veranderingen in de afstelling van de „zero"- en van de „span"-instelknoppen worden enigszins vertraagd weergegeven door de meter. Dus na een verstelling van deze regelknoppen moet even worden gewacht tot de aanwijzing weer stabiel is. Daarna moet zo nodig nog iets worden gecorrigeerd.

Stoffilters vervangen. Jaarlijks moet het interne stoffilter wor-



De Priva-meter moet in principe elke drie maanden worden geijkt, waarbij van ijkgassen gebruik moet worden gemaakt

Maak gebruik van ijkgassen

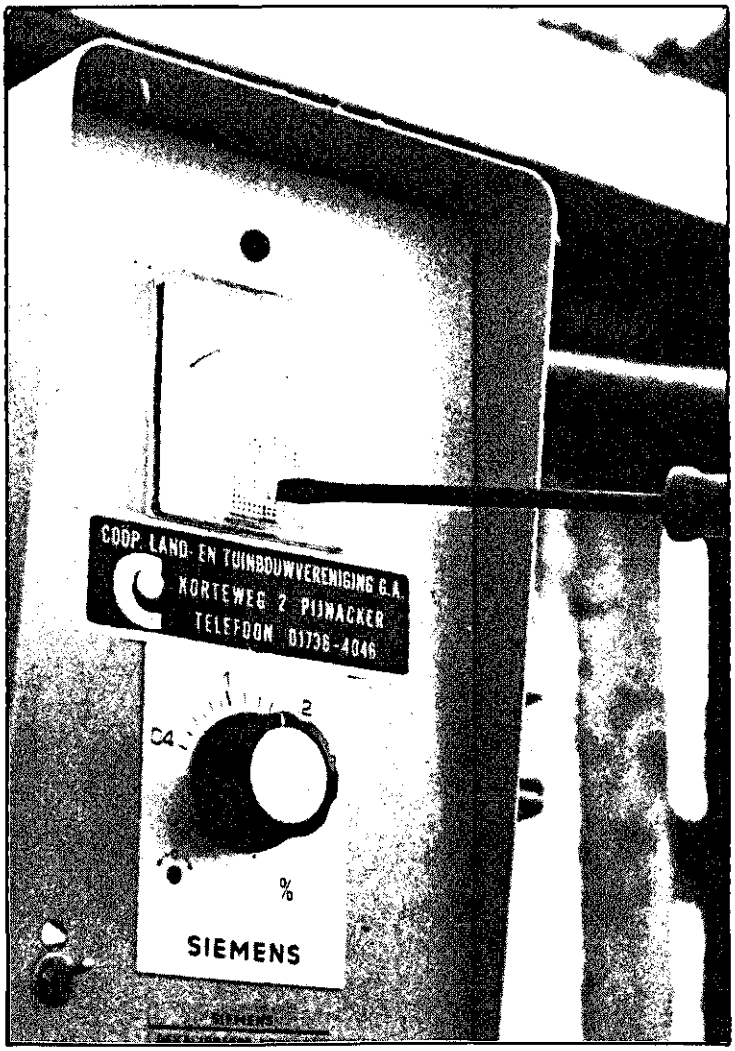
den vervangen om verstopping en foute aanwijzing te voorkomen. Aan de binnenzijde van het apparaat moet daarvoor de luchtinlaat worden losgenomen, waarna het ronde, fijnmazige filter kan worden vervangen. Het stoffilter in de meetslang bij de meetplaats moet afhankelijk van de vervuiling minstens iedere drie maanden worden vervangen.

Siemens CO_2-meter

Ook bij het ijken van de Siemens-meter wordt tegenwoordig geadviseerd gebruik te maken van ijkgassen. De richtlijnen voor het ijken met behulp van buitenlucht, zoals die tot voor kort werden aangegeven in de gebruiksaanwijzing, komen hierdoor dus te vervallen. Voor het ijken zijn patronen ijkgas beschikbaar met een CO_2-concentratie van 300 dpm. Via een bijgeleverde nippel kan de patroon worden aangesloten op de meter. Het advies is minimaal één maal per zes maanden te ijken. De procedure verloopt dan als volgt:

- De meter moet minimaal 1 uur continu in werking zijn voor met het ijken kan worden begonnen.
- Vervolgens wordt de pomp uitgeschakeld door middel van de schakelaar „pump". De meetslang wordt nu losgemaakt van de meter. Het ijkgas-patroon met de bijgeleverde nippel wordt op de luchtinlaat aangesloten. Via de luchtinlaat stroomt het ijkgas door de meetkamer. Dit is te voelen aan de luchtstroom die uit de uitblaasopening van de meter komt.
- Na circa 30 seconden zal de aanwijzing stabiel zijn. Zodra dit het geval is, wordt met een fittingschroevendraaier de stelschroef langzaam zodanig veranderd dat de wijzer exact de CO_2-concentratie van het ijkgas aanwijst. Het is nodig dit langzaam te doen, omdat de meter enigszins vertraagd reageert.
- De aanwijzing is nu geijkt en de meetslang kan weer worden aangesloten.

Er is nog een punt waar op moet worden gelet. Als de netspanning wordt uitgeschakeld, moet de wijzer exact 0 aangeven. Als dit niet het geval is, moet de wijzerstand worden gecorrigeerd. Met een schroevendraaier kan het stelschroefje op de meetschaal worden bijgesteld. Dit stelschroefje mag alleen worden gebruikt voor nulpuntcorrectie bij een geheel uitgeschakelde meter. Dus nooit bij het ijken zelf.



Als de netspanning wordt uitgeschakeld, moet de wijzer exact 0 aangeven. Als dit niet het geval is, moet de wijzerstand worden gecorrigeerd

Om het nulpunt te ijken, kan ook gebruik worden gemaakt van een speciaal filter dat alle CO_2 uit de aangezogen lucht verwijdert. Deze methode wordt nog slechts beperkt toegepast (Maasmond, De Lier). In verband met mogelijke lekkages in de meetslangen verdient het de voorkeur de ijkgassen eerst direct bij de meter in te laten. Vervolgens zouden de ijkgassen ook bij de ingang van de aanzuigslang (in de kas) moeten worden ingeblazen. Zo kan worden getest of er lekkage in de aanzuigslang voorkomt.

Wanneer toch - dit is niet aan te raden - met buitenlucht wordt geijkt, is het van belang te letten op de mogelijke invloed van CO_2 uit omringende schoorstenen en via ventilatie van de naastliggende kassen. Deze invloeden moeten zo gering mogelijk zijn. Het meest geschikte moment is als weinig wordt gestookt en nauwelijks wordt gelucht en als er voldoende wind is. De concentratie is dan midden op de dag 300 à 400 dpm.

Daar waar toch al gebruik wordt gemaakt van een multiplexer en waar dus op meer plaatsen afzonderlijk wordt gemeten, kost het meestal weinig extra moeite ook de concentratie van de buitenlucht continu te meten. Dit is zowel handig voor (globale) controle van de meters, als wel voor het eventueel aanpassen van de gewenste concentratie bij sterk afwijkende concentraties van de buitenlucht. Een te hoge reactie van de meter op wisselende concentraties kan wijzen op een defect in de meter. Neem in dat geval contact op met de installateur.

Stoffilters vervangen. Minimaal één maal per zes maanden moet het fijnstoffilter worden vervangen. De plaatstalen kap moet worden verwijderd en vervolgens moet het kapje van de filterbehuizing los worden geschroefd (zie ook de gebruiksaanwijzing van de meter).

Het groffilter in de meetslang bij het meetpunt moet minstens één maal per zes maanden gereinigd (of vervangen) worden. Reiniging is mogelijk door dit filter enige tijd in wasbenzine te leggen, het vervolgens te spoelen en daarna goed door te blazen.

Algemene aandachtspunten

Naast het al genoemde onderhoud zijn er nog meer punten waarop bij beide meters goed moet worden gelet:

- Controleer de condens-pot regelmatig en tap deze op tijd af. Het overlopen van de condenspot leidt tot (definitieve) beschadiging van de meter.
- Controleer de aansluiting(en) van de meetslangen op het aanzuigen van valse lucht. Bijvoorbeeld met behulp van de rook van een sigaret.
- Controleer de meetslang(en) op eventuele knikken en lekkages.

Samenvatting

Voor een betrouwbaar meetgegeven vereist de CO_2-meter periodiek onderhoud en een correcte ijking. Voor het ijken zijn bussen met ijkgassen beschikbaar. Volg nauwkeurig de voorgeschreven procedure.

IJken met buitenlucht is af te raden. De concentratie van de buitenlucht varieert te sterk.

Een goede CO-bewaking voorkomt calamiteiten

Het controleren en bewaken van rookgassen op schadelijke stoffen is vooral bij het centraal CO_2 doseren noodzakelijk. Het geeft echter onvoldoende zekerheid wanneer alleen controle-apparatuur wordt geïnstalleerd. De gevoelige meetapparatuur eist dat deze regelmatig door de gebruiker wordt gecontroleerd. In het hierna volgende zullen de voornaamste controle-maatregelen worden belicht.

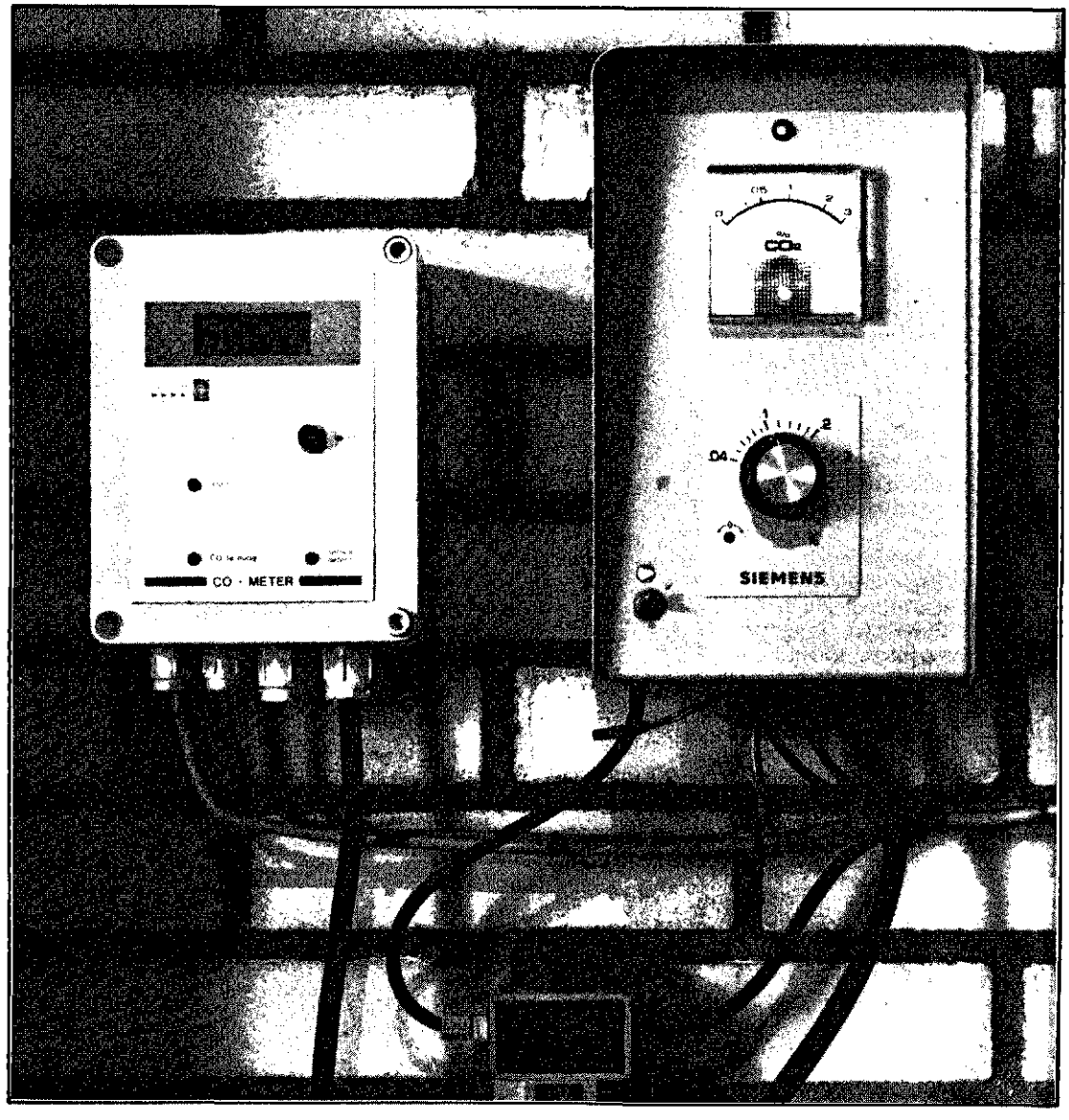
De voor CO_2 gebruikte rookgassen zijn meestal afkomstig van een op gas gestookte ketel. Gas is voor dit doel de meest veilige brandstof. Bij een goede verbranding wordt aardgas ontleed in CO_2 en waterdamp. Vereenvoudigd kan dit als volgt worden gesteld: $CH_4 + 2\,O_2 \dashrightarrow CO_2 + 2H_2O$. Soms verloopt het verbrandingsproces echter niet helemaal optimaal. In dat geval kunnen als verbrandingsprodukten eveneens etheen (ook ethyleen genoemd) en koolmonoxide ontstaan. In chemische symbolen is dat respectievelijk C_2H_4 en CO.
Ethyleen is in zeer lage concentraties al zeer schadelijk voor planten en koolmonoxide is kwalijk voor de gezondheid van de mens. C_2H_4 en CO ontstaan altijd tegelijkertijd. Om ze te signaleren, is het dus voldoende als een van beide wordt gemeten. Aangezien meetapparatuur voor CO veel goedkoper is dan meetapparatuur voor C_2H_4, kan een beveiliging tegen onverbrande rookgassen het beste met een CO-detector worden uitgevoerd.

Verschillen in meetapparatuur

Er zijn verschillende merken en typen CO-detectoren in de handel die een continue bewaking mogelijk maken. Er moet onderscheid tussen twee meetmethoden worden gemaakt:

- CO-detectoren die werken volgens het principe halfgeleiding. Daarbij wordt het te meten monster vergeleken met de omgevingslucht.
- CO-detectoren die werken met een brandstofcel. Dat laatste is een zogenaamd elektrochemisch element. Dit element wordt langzaam opgebruikt, afhankelijk van de hoeveelheid CO die de cel bereikt.

Goedkoper, maar minder veilig is de nog vaak uitgevoerde incidentele (niet continue) meting met een meetbuisje. Deze manier van meten komt hier verder niet meer aan de orde. De prijs van apparatuur voor een continue bewaking ligt rond de *f* 4.000.



Een op een goed zichtbare plaats gemonteerde CO-meter

CO-meter alleen betrouwbaar bij regelmatige controle

Controle op apparatuur

Voor alle systemen geldt dat de apparatuur op een goed zichtbare plaats moet worden gemonteerd zodat het uitvoeren van een controle mogelijk is en meetwaarden snél en duidelijk zichtbaar zijn. Daarnaast is de zorg voor een voldoende schone omgeving van belang. Gevoelige meetapparatuur in een vervuilde omgeving vergroot de kans op storingen, onjuiste metingen en een versnelde slijtage.
De halfgeleider detector. Bij dit

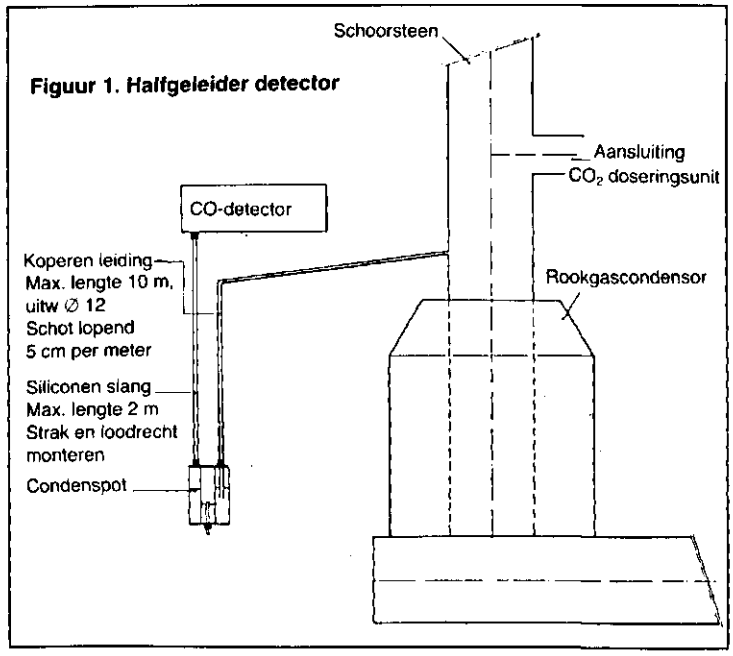
type detector wordt de meetlucht uit het rookkanaal na de condensor afgetapt (**figuur 1**). Voor een goede meting moet het meetmonster stofvrij en van een vrij constante temperatuur en luchtvochtigheid zijn. Daarvoor passeren de meetgassen een waterfilter. Door middel van een luchtpomp worden rookgassen uit het schoorsteenkanaal aangezogen. De rookgassen passeren daarna de waterfilter (borrelpot). Deze waterfilter doet tevens dienst als condenspot met een automatische overloop. Het gefilterde luchtmonster wordt vervolgens naar de detectorkast gevoerd. Daar wordt de lucht gecontroleerd op hoeveelheid en stroming voordat dit in de eigenlijke detector komt. Bij deze uitvoering zijn de volgende controle-werkzaamheden van belang:

- Controleer of meetleiding, waterfilter (borrelpot) en detector volgens voorschrift zijn gemonteerd. Volg daarvoor de installatie-voorschriften van de fabrikant.
- Controleer of het water in de waterfilter op het juiste niveau staat.
- Laat de detector zoveel mogelijk in bedrijf staan. Bij elke start van de brander volgt een zelfcontrole van het apparaat door nabootsing van een CO-waarneming. Pas na de zelfcontrole wordt de CO_2-installatie vrij gegeven. Als het apparaat langere tijd niet in bedrijf is geweest, vergt de zelfcontrole meer tijd.
- Controleer de apparatuur regelmatig (liefst maandelijks) en tenminste voor het seizoen begint. Dit kan door de nylon slang van de borrelpot los te maken en een brandende aansteker vlak bij de slang te houden. Door de CO moet de meter uitslaan. Als dit niet gebeurt, moet de sensor worden vervangen.
- De alarmgrens ligt op 30 dpm.

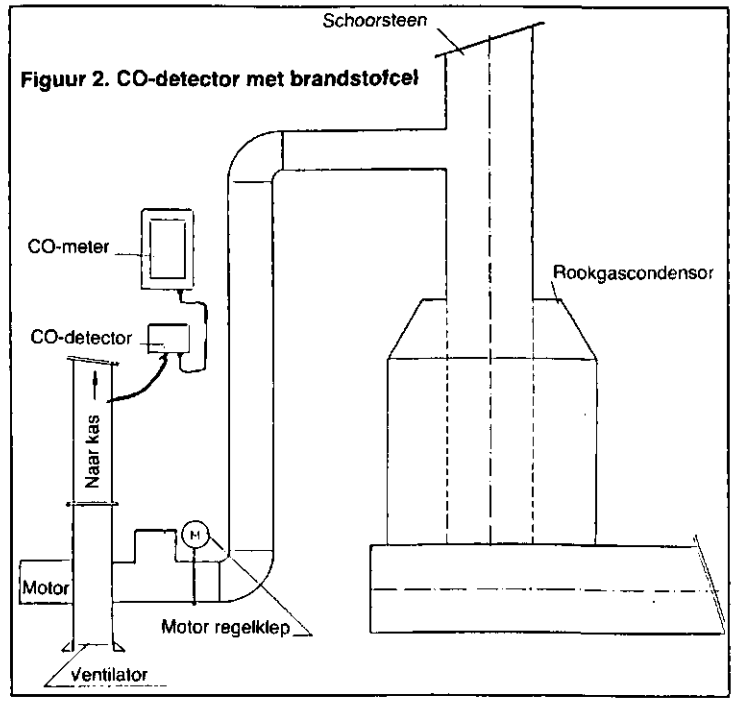
CO detector met brandstofcel. Bij deze uitvoering komt de meetlucht niet rechtstreeks uit het rookkanaal (**figuur 2**). De te meten lucht wordt uit het hoofdkanaal na de CO_2-transportventilator door overdruk naar de meter geleid. Drukvariaties bij de meter moeten zoveel mogelijk worden voorkomen. De te meten lucht wordt bij een opening onder de meter gebracht. In die opening zit een filter die water en vuil moet tegenhouden. Na de filter passeert de lucht een membraam en komt vervolgens bij de meetcel. Bij deze uitvoering zijn de volgende controle-werkzaamheden van belang:

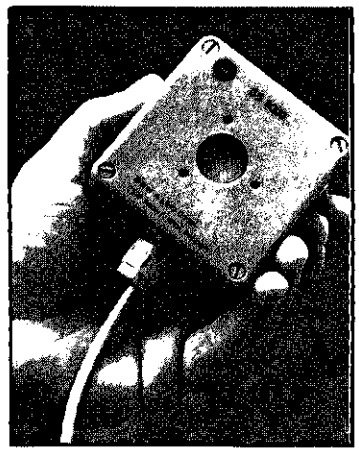
- Controleer ook hier of de meetleiding, de meter en de verwerkingseenheid volgens voorschrift zijn gerealiseerd. Neem daarvoor kennis van de installatie-voorschriften.
- Voor een correcte werking moet de meter steeds in bedrijf geschakeld blijven.

Figuur 1. Halfgeleider detector



Figuur 2. CO-detector met brandstofcel





Detector voor CO-bewaking van het type brandstofcel

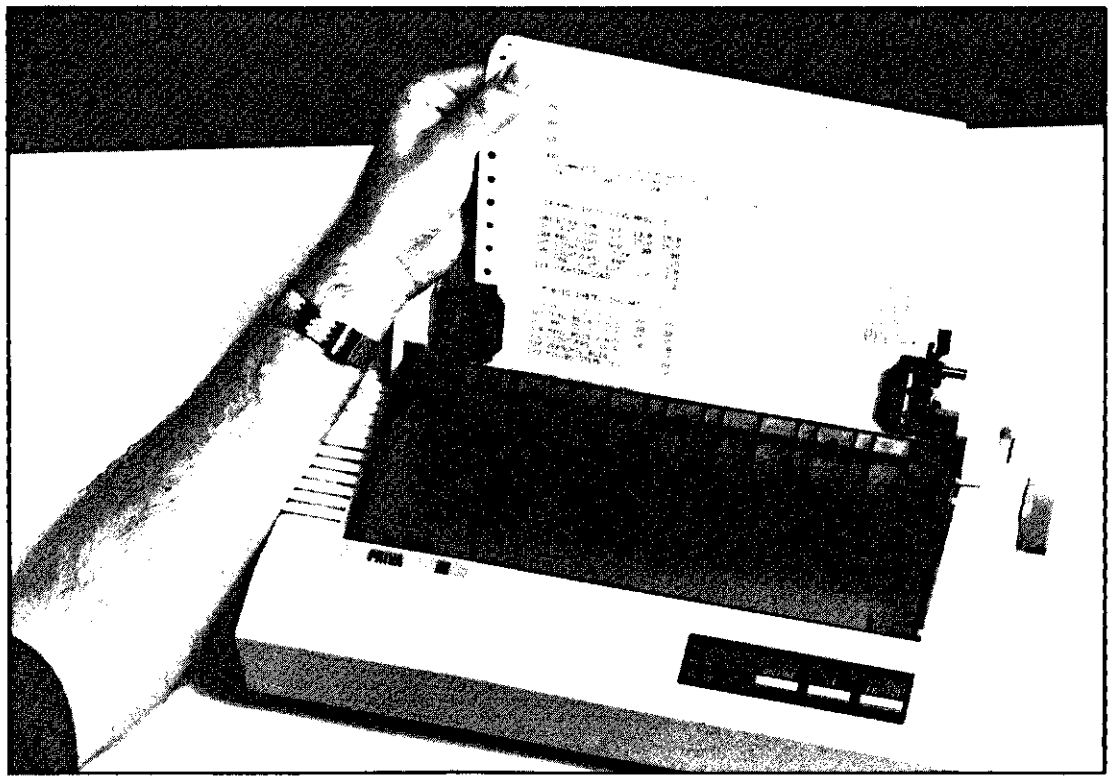
- De meter is bestand tegen een hoge luchtvochtigheid, maar niet tegen water (condens) en vuil. Daarom mag zich in de verbindingsslang geen condenswater kunnen ophopen.
- De gemeten lucht is meestal rookgas en bijgevoegde omgevingslucht. Om die reden is hierbij een lagere alarmbegrenzing nodig (15 dpm).
- De brandstofcel wordt langzaam opgebruikt en moet na verloop van tijd worden vervangen. De gemiddelde levensduur wordt op ruim drie jaar geschat.
- Het is nodig dat de meter regelmatig op een goede werking wordt gecontroleerd. Daarvoor kan bijvoorbeeld sigaretterook bij de voeleropening worden geblazen. De meter moet daar onmiddellijk op reageren.
- Om verloop van de meetuitslag te controleren, is een jaarlijkse controle met ijkgas gewenst.

Samenvatting

Een goede verbranding is een vereiste voor het doelmatig doseren van CO_2. Bij onvolledige verbranding ontstaan ethyleen en koolmonoxyde (CO). Er zijn mogelijkheden voor een continue controle en bewaking op CO van de rookgassen. De gevoelige meetapparatuur vereist een regelmatige controle. In dit artikel is aangegeven wat de gebruiker aan nazorg kan doen.

Automatisch regelen CO_2-dosering

Voor het regelen van de CO_2-dosering bestaan programma's voor de klimaatcomputer. Programma's waarin meer informatie wordt verwerkt over te verwachten meer-opbrengsten door een hogere CO_2-concentratie of een langere doseertijd zijn nog in het onderzoekstadium. De mogelijkheden met de bestaande regelprogramma's worden hier nader belicht: het regelen van de CO_2-dosering en het regelen van de temperatuur van het ketelwater.



Het wordt steeds duidelijker dat optimalisering van de CO_2-dosering een belangrijke zaak is. Goede effecten van de optimalisatie zijn alleen te verwachten als de dosering goed regelbaar is. Dus zowel optimalisatie van de doseerinstallatie als van de CO_2-metingen en het regelprogramma.

Bepaling gewenste concentratie

De optimale CO_2-concentratie wordt vooral bepaald door:

- Het effect van de concentratie op de opbrengst. Daarbij spelen met name de klimaatfactoren licht, temperatuur en luchtvochtigheid een rol.
- De kosten van het doseren van CO_2. Deze worden bepaald door de prijs van CO_2 en de benodigde hoeveelheid. Wat de prijs van CO_2 betreft, is het bepalend of de CO_2 als bijprodukt van het verwarmen wordt geleverd („gratis CO_2"). Als de brander voor de produktie van CO_2 moet worden ingezet, is de warmte het bijprodukt („dure CO_2").

Voor de benodigde hoeveelheid zijn de opname-capaciteit van het gewas en de hoeveelheid CO_2 die door ventilatie verloren gaat, bepalend. De prijs van CO_2 is redelijk te benaderen. Moeilijker is het om de opname ervan en het effect op de eindopbrengst voldoende nauwkeurig te bepalen. Optimalisatie-programma's die daar informatie over geven zijn in onderzoek. De eerste resultaten wijzen erop dat hier goede aanvullingen mogelijk zijn.

Met de op dit moment beschikbare regelingen is al een redelijke benadering van optimalisering mogelijk. Deze dienen daarom voorlopig als basis.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen wel of geen CO_2-verlies door ventilatie en de kosten van CO_2. Hierdoor kunnen vier verschillende situaties worden onderscheiden:

- Geen ventilatie en 'gratis CO_2' beschikbaar. De concentratie mag dan hoog zijn. Laat de concentratie echter niet zo hoog oplopen dat er schade aan het gewas kan ontstaan.
- Geen ventilatie en relatief dure CO_2 beschikbaar. Door het ontbreken van CO_2-verliezen van betekenis mag worden aangenomen dat alleen CO_2 voor opname door het gewas wordt toegevoerd. Er mag dan dus ook een hoog niveau worden gehandhaafd.
- Wel ventilatie en „gratis CO_2" beschikbaar. Zolang de CO_2 vrijwel zonder kosten beschikbaar is, mag een hoge concentratie worden nagestreefd. Deze situatie komt voor als de brander is ingeschakeld voor de produktie van warmte.
- Wel ventilatie en relatief dure CO_2 beschikbaar. Hierbij gaan de CO_2-verliezen door ventilatie een belangrijke rol spelen. Naarmate de ventilatie toeneemt, zal de na te streven concentratie lager worden. De laagste concentratie die wordt ingesteld, is in het algemeen de concentratie van de buitenlucht.

Voor de regeling betekent dit dat in de doseerperiode wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijke concentratie. Die waarde wordt veelal licht- en ventilatie-afhankelijk bijgesteld.

Een lagere waarde wordt nagestreefd als wordt geventileerd en de CO_2 relatief duur is. De meeste CO_2-programma's hebben daarvoor veelal twee instelbare CO_2-concentraties. Eén (hoge) situaties en één (lagere) concentratie voor de laatste situatie. De lagere concentratie kan afhankelijk van de raamstand en de windsnelheid worden verlaagd tot het CO_2-niveau van de buitenlucht.

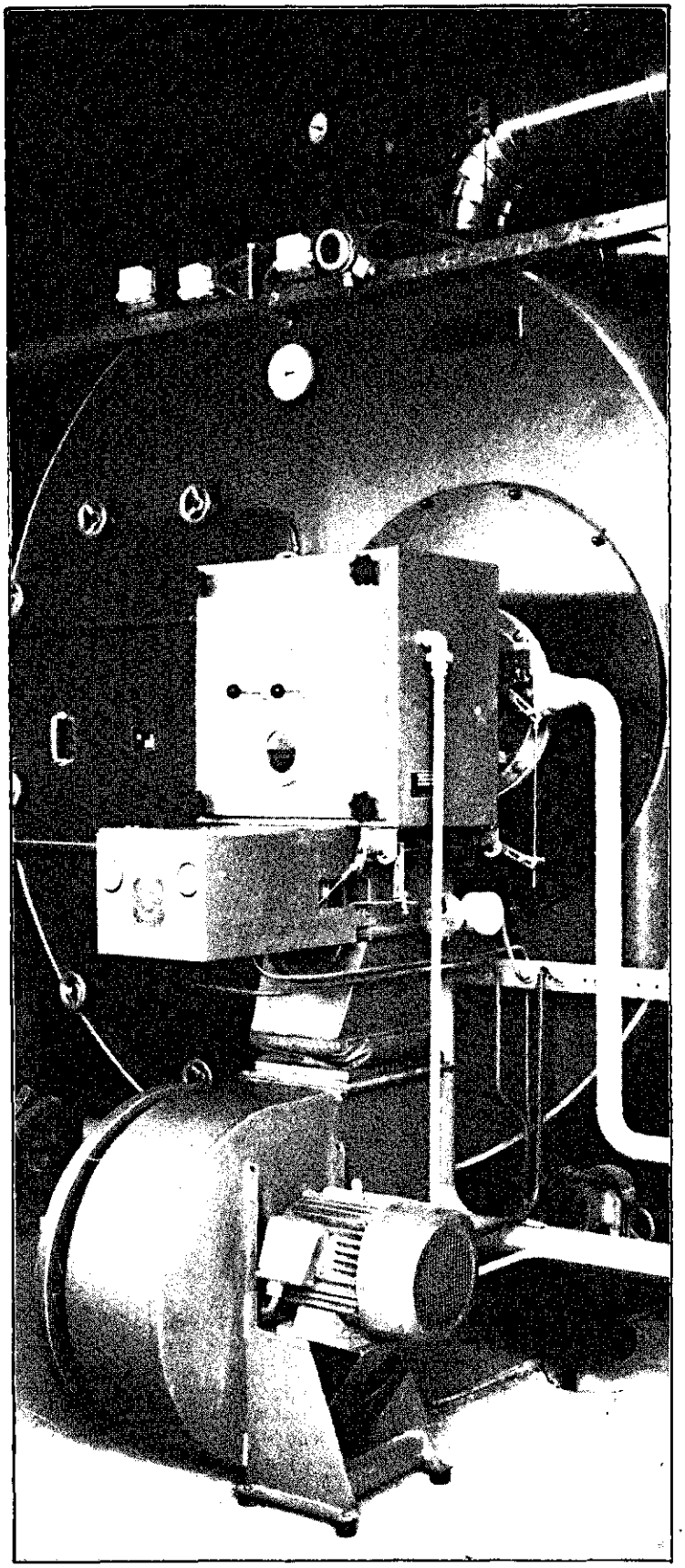
De regelmogelijkheden verschillen nu nogal van computer tot computer. De uitgebreide regelingen zorgen ervoor dat slechts weinig met de hand hoeft te worden bijgesteld.

Regeling ketelwatertemperatuur

Wanneer de wens bestaat gedurende een langere periode CO_2 te doseren, is dat alleen zinvol als de vrij gekomen warmte kan worden benut of tijdelijk kan worden opgeslagen (gebufferd). Een mogelijkheid daarbij is de ketel meer branduren in de lage branderstand te laten maken. Dat is een situatie waarbij wel voldoende CO_2 wordt geproduceerd, maar waarbij het overschot aan warmte minimaal is. Daarbij kan een programma voor het regelen van de temperatuur van het ketelwater een zinvolle aanvulling van de regeling zijn.

Voor het automatisch regelen van de CO_2-dosering zijn nu regelprogramma's beschikbaar die een vergevorderde optimalisering van het doseren mogelijk maken

Een mogelijkheid om zo lang mogelijk te kunnen doseren, is de temperatuur van het ketelwater steeds maar een aantal graden hoger te houden dan de hoogst gevraagde temperatuur in een afdeling



Programma's voor ketelwater-temperatuur: ketel als warmtebuffer

Dit programma regelt de temperatuur van het ketelwater steeds maar een aantal graden hoger dan de hoogst gevraagde temperatuur in een afdeling. Hierdoor functioneert de ketel zelf tijdelijk als buffervat. Tevens is er dan een energiebesparing te bereiken. Deze besparing is veelal niet meer dan 0,1%. Naast het regelen van de ketelwater-temperatuur hebben de meeste programma's vaak de mogelijkheid andere warmte-opnemers in te schakelen. Met de schakeling kan bijvoorbeeld een automatische verhoging van de begrenzing van de minimumbuis worden gerealiseerd of het openen van een klep voor warmte-opslag in een warmtebuffer. De schakeling komt tot stand vlak voordat de maximale temperatuur van het ketelwater wordt bereikt.
Voor het realiseren van deze regeling wordt meestal het stuursignaal voor de branderstand – die afkomstig is van de regelthermostaat – vervangen door een nieuw stuursignaal uit de computer. Dit nieuwe signaal regelt de brander afhankelijk van de gemeten temperatuur van het ketelwater, van de (berekende) gewenste watertemperatuur en van de vraag naar CO_2.
Vaak blijven de bestaande brandersturing en thermostaten wel gehandhaafd. Bij eventuele storing van de automatische regeling kan dan worden omgeschakeld naar de oorspronkelijk brandersturing.

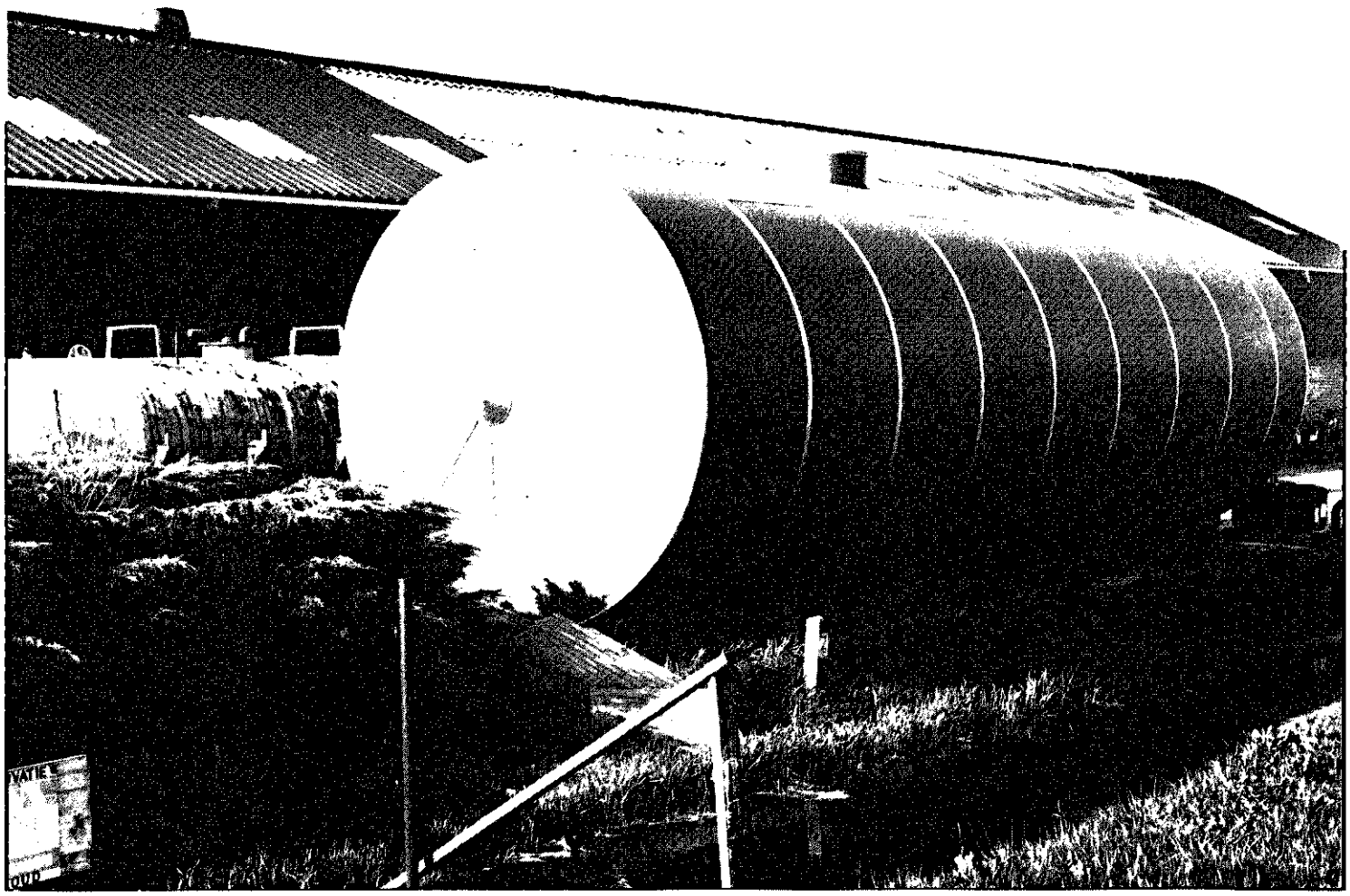
Beperkingen

De warmtebuffering van de ketel zelf is niet groot. Zonder extreme afvoer van warmte is de maximale temperatuur van het ketelwater binnen anderhalf uur bereikt. De winst in doseertijd is dan niet zo groot. Dit wordt vooral veroorzaakt doordat de laagste ketelwater-temperatuur meestal niet lager dan 75°C mag zijn. De temperatuuropslag van 75°C naar 100°C is klein. Instellen van een lagere minimumtemperatuur van het ketelwater geeft grote kans op condensatie en daardoor op corrosie in de ketel. De reden daarvoor is dat er soms van grote verticale temperatuurverschillen van het ketelwater sprake is. Wanneer een shuntpomp met voldoende capaciteit voor een goede menging in de ketel zorgt, kan de minimum ketelwater-temperatuur mogelijk wat lager worden ingesteld.
Een andere beperking bij dit programma is de soms beperkte mogelijkheid om de brander te regelen. Het aan- en uitschakelen van een relatief hoge „laagste branderstand" veroorzaakt een onrustige regeling en/of grote schommelingen rond de gewenste temperatuur.

Samenvatting

Voor het automatisch regelen van de CO_2-dosering zijn nu regelprogramma's beschikbaar die een optimalisering van het doseren mogelijk maken. Het effect van deze automatisering wordt niet alleen bepaald door het computerprogramma. Ook de kwaliteit en de regelbaarheid van de doseer-installatie en goede CO_2-metingen bepalen het te verwachten resultaat.
De mogelijkheden voor de regeling verschillen van fabrikaat tot fabrikaat. Meer uitgebreide regelprogramma's voor CO_2 zijn nog in onderzoek.

Opslag van overtollige warmte



Als voor het CO_2 doseren rookgassen worden gebruikt, zal er warmte vrij komen. Deze warmte kan niet altijd gelijktijdig nuttig worden aangewend. Opslaan van de overtollige warmte in een buffertank is dan een alternatief. Een pasklaar aansluitschema voor elk bedrijf is niet te geven vanwege de verscheidenheid aan installaties. Het principe is wel universeel en wordt hierna toegelicht.

In **figuur 1** is een normale situatie getekend, zoals die op een tuinbouwbedrijf voorkomt. De ketel is verbonden met een verdeelstuk, waarop de regelgroepen van de kassen zijn aangesloten. Deze groepen kunnen ook transportgroepen zijn voor een ring-transport-leidingsysteem.
De shuntpomp pompt het water vanuit de aanvoer uit de ketel naar de onderkant van de ketel, zodat een zo gelijkmatig mogelijke temperatuurverdeling in de ketel ontstaat. Deze shuntpomp mag niet als vulpomp voor de opslagtank worden gebruikt, omdat het terugkerende water daarvoor een te lage temperatuur heeft. De rookgascondensor is in de retourleiding getekend. Het kan ook het primaire gedeelte van een combi-condensor zijn. Meestal zijn condensors geplaatst in de retourleiding van de regelgroep. Om de tekening eenvoudig te houden, is de rookgascondensor in de retourleiding naar de ketel getekend.

Wanneer er geen of weinig vraag naar warmte is, zal de warmte die in de ketel ontstaat tijdens het CO_2 doseren, moeten worden opgeslagen in de warmte-opslagtank. In **figuur 2** is het transport van warmte naar de tank getekend. Wanneer de temperatuur van het ketelwater te hoog wordt, zal de motorklep VK1 openen, waarna pomp 1 het water naar de tank transporteert. Het water wordt bovenin de tank gebracht. Het warme water blijft bovenin en het koude water zal via de retourleiding aan de onderzijde van de tank terugstromen naar de ketel.
De kringloop is nu rond en de tank zal geleidelijk worden gevuld met warm water. Als de temperatuur boven- en onderin de tank gelijk is (ongeveer 95°C), dan is de tank aan zijn maximale opslag gekomen.
De capaciteit van pomp 1 moet nauwkeurig worden bepaald. De hoeveelheid water die naar de tank wordt getransporteerd, moet een warmte-inhoud hebben die gelijk is aan de opgewekte warmte van de brander in de „laagstand" of de „CO_2-stand". Is de pomp te klein, dan zal de temperatuur van het ketelwater oplopen en de brander zal afslaan, waardoor minder CO_2 kan worden gedoseerd. Wanneer de pomp daarentegen te groot is, daalt de temperatuur van het ketelwater. De keteltemperatuur kan dan beneden de dauwpunttemperatuur dalen wat condensatie in de ketel kan veroorzaken.

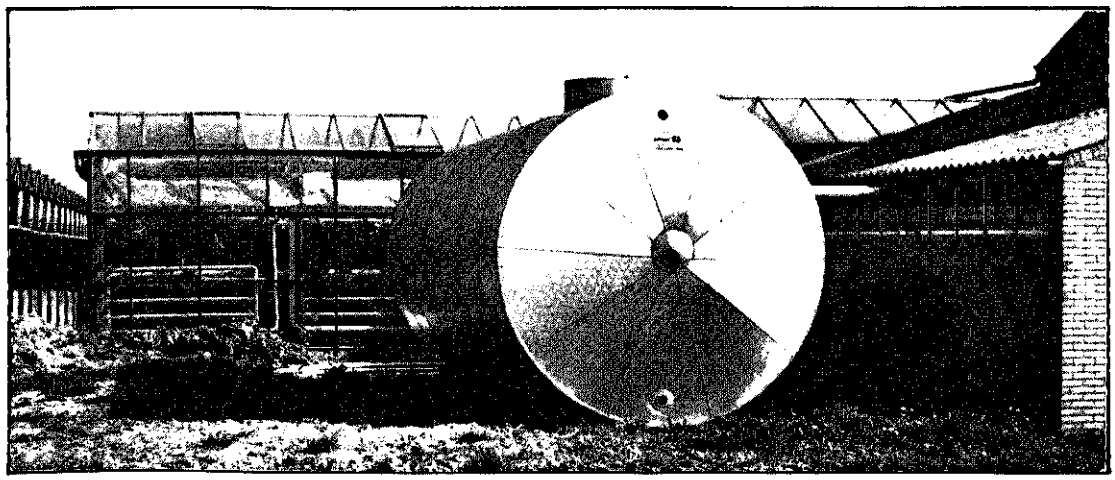
Expansie van het water

Als de tank is opgenomen in een gesloten systeem, zal men bedacht moeten zijn op expansie van het water. Als de watertemperatuur in de tank varieert van 10 tot 95°C, dan zal met een expansie van 3,9% van de tankinhoud rekening moeten worden gehouden. Een tank met een inhoud van 30.000 liter water met een temperatuur van 10°C eist na

opwarmen tot 95°C een extra volume van 1180 liter. De vergroting van de expansievaten is afhankelijk van het aanwezige expansie-systeem.
Ook moet de tank bestand zijn tegen de druk in het verwarmingssysteem. Onvoldoende expansie leidt tot beschadiging. Bijvoorbeeld vervorming van de tank, tankbreuk of lekkage. Bij gebruik van een oude olietank als warmtebuffer is het verstandiger een warmte-wisselaar toe te passen, zodat de tank zelf zijn expansie op kan vangen. In dit geval hoeft ook de bestaande expansie-installatie niet te worden vergroot. Ook is het mogelijk om, bij voldoende hoogte van de tank, de tank zelf als expansievat te gebruiken.

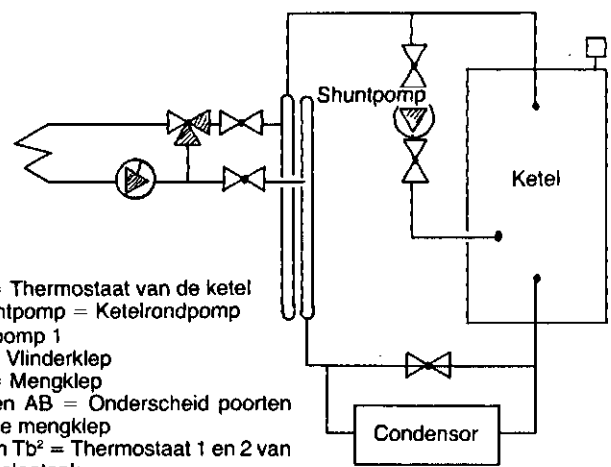
Benutten warmte uit opslagtank

Als de opslagtank geheel gevuld is met warm water, kan de warmte vanuit de tank in de verwarmings-installatie worden gebracht. Dit hoeft niet in de nacht te gebeuren. Ook kan gedurende de dag, bij voldoende warmtevraag, de warmte vanuit de tank worden gebruikt. Wanneer het later op de dag weer warmer wordt, is er op die manier extra ruimte voor de opslag van warmte aanwezig.
Bij benutting van de opgeslagen warmte uit de buffer wordt de warmte boven uit de tank onttrokken. Daar zal de temperatuur het hoogst zijn. De klep VK1 is dan gesloten en pomp 1 gestopt. Om het water te kunnen onttrekken, wordt de driewegklep MK geopend (poort A). Poort B is dan gesloten. De tweewegklep VK2 is gesloten. Het warme water kan nu via A-AB van de mengklep naar het verdeelstuk stromen. Wordt de temperatuur bovenin de tank te laag, dan kan de mengklep water bijmengen vanuit de ketel. De klep VK2 is nog steeds gesloten.
Als poort B van de mengklep MK geheel geopend is, zal de tweewegklep VK2 openen, zodat de volledige stroom vanuit de ketel naar het verdeelstuk kan stromen. De afmetingen van mengklep MK moet zodanig zijn gedimensioneerd dat de warmte uit de tank zo snel mogelijk kan worden onttrokken als daarvoor de gelegenheid is. Dit in tegenstelling tot klep VK1 en pomp 1, die niet meer hoeven te doen dan de opgewekte warmte van de laagstand van de brander te transporteren naar de warmte-opslagtank.
Wanneer de vrijgekomen warmte bij het doseren van CO_2 wordt gebufferd, kan de aldus opgeslagen energie in een later stadium worden benut. Een doordachte uitvoering voorkomt ongewenste gevolgen.



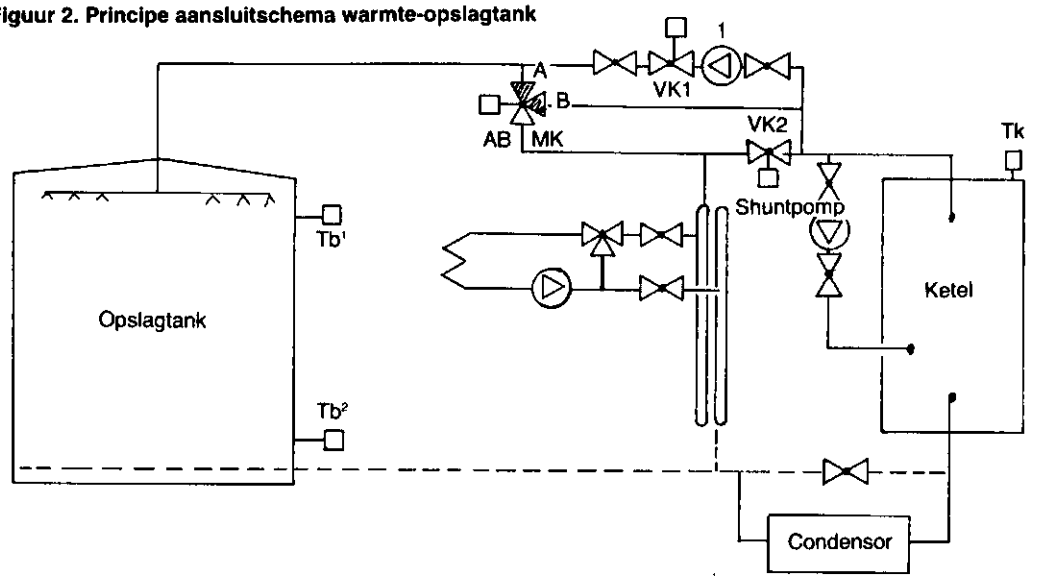
De hoeveelheid water die naar de tank wordt getransporteerd, moet een warmte-inhoud hebben die gelijk is aan de opgewekte warmte van de brander in de „laagstand" of de „CO_2-stand"

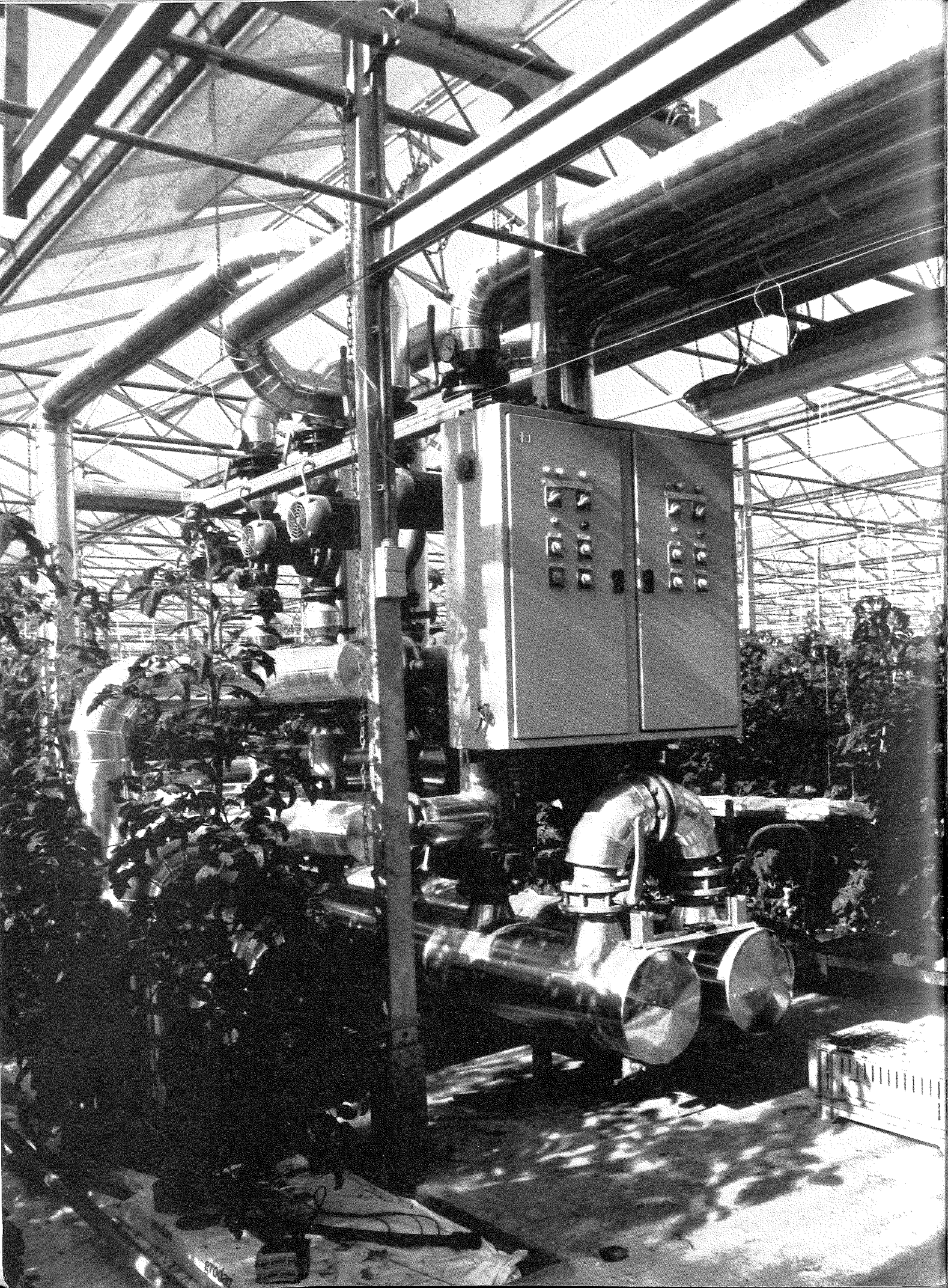
Figuur 1. Schema voor de gewone situatie zonder opslag van warmte



Tk = Thermostaat van de ketel
Shuntpomp = Ketelrondpomp
P = pomp 1
VK = Vlinderklep
MK = Mengklep
A,B en AB = Onderscheid poorten van de mengklep
Tb¹ en Tb² = Thermostaat 1 en 2 van de opslagtank

Figuur 2. Principe aansluitschema warmte-opslagtank





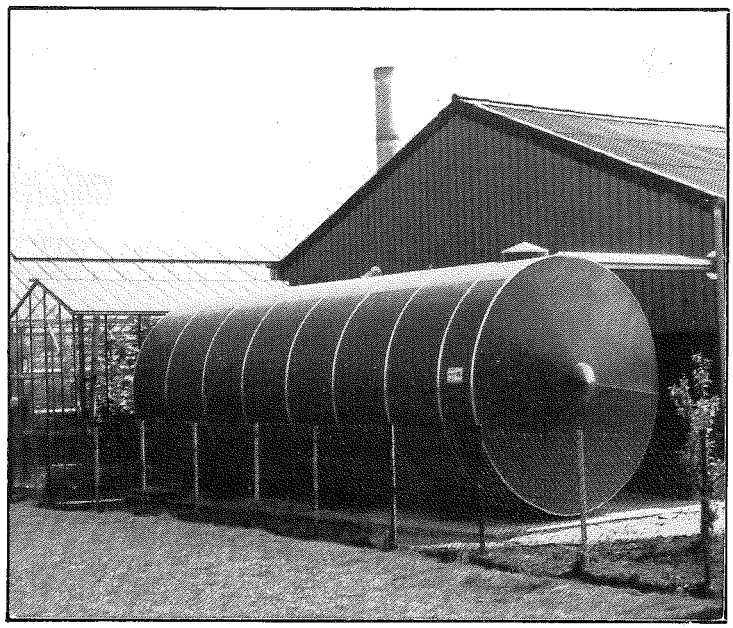
Regeling van warmte-opslag

Voordat een buffertank voor de opslag van warmte wordt geïnstalleerd, moet er rekening mee worden gehouden dat een en ander nogal wat automatisering vraagt. De manier waarop momenteel warmtebuffers worden geïnstalleerd, is verre van universeel. Het komt voor dat pas na de installatie een regeltechnicus wordt uitgenodigd om het systeem te automatiseren. Er bestaat nog geen universele programmatuur. Er moet nogal eens worden geïmproviseerd met bestaande programmatuur. Het ontwerpen van aangepaste programma's maakt de regeling echter duur. Een standaard methode zou voor alle partijen voordelen bieden. In dit artikel volgt een beschrijving van wat er allemaal moet worden geregeld. Ook worden een aantal wensen uit de praktijk nader belicht.

Als er vraag is naar CO_2 wordt eerst bekeken of de brander in werking is. Is dit het geval, dan start de CO_2-dosering. Als de brander niet in werking is, wordt deze gestart en naar een meestal vaste CO_2-stand gestuurd. In het algemeen is dit de laagste branderstand. De temperatuur van het ketelwater zal dan hoger worden, omdat er geen vraag is naar warmte. Om te voorkomen dat de brander stopt doordat de ketel de maximale temperatuur bereikt, moet even daarvoor de warmte worden afgevoerd.
Als er een warmtebuffer aanwezig is, kan de tijdelijk te veel geproduceerde warmte daarin worden opgeslagen. De manier waarop dat transport van warmte plaatsvindt, is afhankelijk van de geïnstalleerde regeling. In het vorige artikel is van een uitvoering de realisatie beschreven. Na het vol raken van de buffer kan er soms nog warmte af worden gevoerd door middel van een automatische verhoging van de ingestelde minimum buistemperatuur. Zijn beide mogelijkheden maximaal benut, dan zal de temperatuur van het ketelwater even later de maximaal toelaatbare temperatuur overschrijden en wordt de brander uitgeschakeld. Dan kan geen CO_2 meer worden gedoseerd.

Afvoer warmte uit buffer

Hoe de opgeslagen warmte kan worden benut, is eveneens in het vorige artikel beschreven. Zowel overdag als 's nachts kan van de warmte die in de buffer is opgeslagen gebruik worden gemaakt. Wanneer (ook overdag) de berekende buistemperatuur lager of slechts iets hoger is dan de temperatuur boven in de buffer, kan warmte uit de buffer worden onttrokken. Wordt de temperatuur van het retourwater naar de buffer gelijk of hoger dan het water in de buffer, dan stopt de waterstroom uit de buffer. Dan zal alleen warmte aan de ketel kunnen worden onttrokken.



Links: Soms kunnen zich situaties voordoen waarbij een extra minimum buis teelttechnisch geen voordelen biedt, of mogelijk zelfs nadelig is. Ondanks dat kan worden besloten toch door te gaan met het doseren van CO_2

Praktijkervaringen en wensen

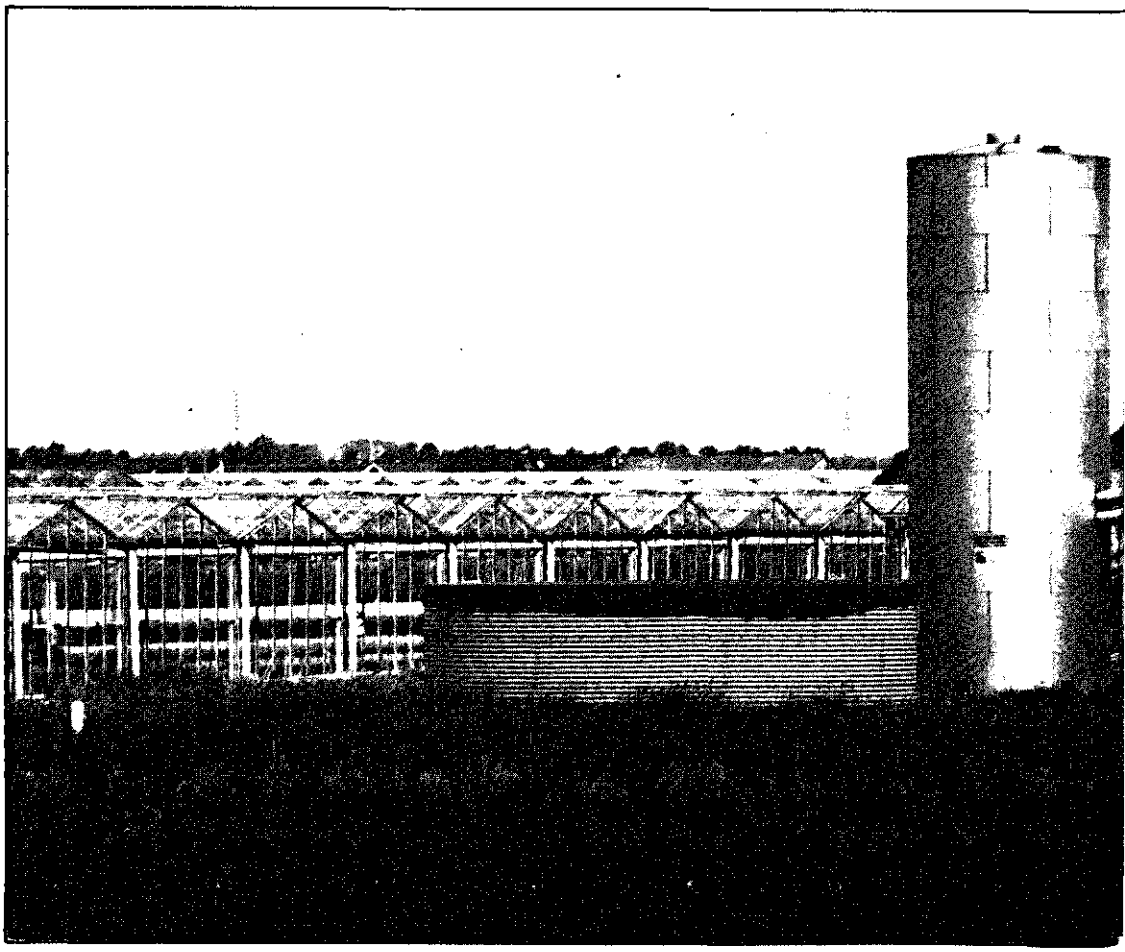
Het regelen van de opslag van warmte en het gebruik van deze opgeslagen warmte gebeurt in de praktijk nogal verschillend. Vaak is het verschil in uitvoering van de technische installatie daar de oorzaak van; bijvoorbeeld een te beperkte capaciteit van de buffertank of een brander die onvoldoende laag kan worden geregeld. Deze problemen vragen een technische oplossing.
Vanuit de praktijk worden aanvullende wensen aangaande de regeling geuit. Bijvoorbeeld een betere benutting van de buffercapaciteit. In situaties waarbij de warmtebuffer slechts gedeeltelijk wordt opgewarmd en er meer behoefte aan CO_2 is, kan in principe vrijwel zonder kosten ook meer CO_2 worden gedoseerd. De computer moet daarvoor steeds berekenen wat de resterende buffercapaciteit is. Dit vraagt echter aanmerkelijk meer meetpunten voor de temperatuur van het water in de buffer. Realisatie hiervan is niet zo eenvoudig en bij de huidige regelprogramma's is dit nog niet mogelijk.
Het benutten van de opgeslagen warmte blijkt meestal minder problemen op te leveren. Men slaagt er – op een klein aantal zomerse nachten na – vrijwel altijd in de op de dag opgeslagen warmte 's nachts weer in de kas kwijt te raken. Dit wordt vaak gerealiseerd door voor een deel van de nacht een extra minimum buistemperatuur in te stellen. Of deze aanwending altijd tot een nuttig gebruik van warmte leidt, is moeilijk te achterhalen. Het effect is namelijk moeilijk meetbaar. Toch hebben diverse gebruikers hier gunstige ervaringen mee opgedaan.
Soms kunnen zich situaties voordoen waarbij een extra minimum buis teelttechnisch geen voordelen biedt, of mogelijk zelfs nadelig is. Ondanks dat kan worden besloten toch door te gaan met het doseren van CO_2. De vrijkomende warmte moet dan bij voorkeur in de nacht worden aangewend. De wens bestaat dat er voor die situaties een voorwaardelijke verhoging van de minimum buis is. De verhoging van de buis-begrenzing mag dan alleen worden gerealiseerd als anders de opgeslagen warmte onvoldoende wordt afgevoerd. Een dergelijke aanpassing van de bestaande regelingen vraagt nogal wat voorspellingen en rekenwerk van de computer.
In nachten waarbij de kans op het niet benutten van de opgeslagen warmte groot is (warme nachten), is vaak tevens de luchtvochtigheid hoog. Het zou dus ook mogelijk kunnen zijn een vochtafhankelijke verhoging van de minimum buis-begrenzing toe te passen. Hiermee wordt geëxperimenteerd.

Samenvatting

De regeling van de warmtebuffer wordt tot op heden op verschillende manieren gerealiseerd. In het voorgaande is één van de mogelijkheden nader belicht. Men is eraan gewend geraakt dat de computer ervoor zorgt dat dit alles logisch wordt geregeld.
Het ontwikkelen van speciaal aangepaste programmatuur is duur. Door meer overleg vooraf tussen tuinder, installateur en regeltechnicus kunnen overbodige kosten worden vermeden. Bovendien zijn de wensen om de regeling te optimaliseren dan beter realiseerbaar.

Capaciteit warmte-opslag moet bij bedrijf passen

De gewenste capaciteit van de buffertank kan verschillen van bedrijf tot bedrijf. Zowel een te kleine als een te grote tank is ongewenst. Een te kleine tank biedt onvoldoende buffercapaciteit. Een te grote tank beperkt de mogelijkheid tot terug levering van de opgeslagen warmte. De warmte-inhoud per liter is dan te gering. Het zal dus duidelijk zijn dat de capaciteit van de buffertank aan het bedrijf moet zijn aangepast.



De wijze waarop de capaciteit van de buffertank kan worden berekend, wordt duidelijk uit het volgende praktijkvoorbeeld.

Uitgangspunten. De effectief aan het water overgedragen warmte wordt hier afgerond op 7.000 kcal per m^3 aardgas. Aanvankelijk is het rendement (ketel + condensor) aanmerkelijk hoger. Zodra de tanktemperatuur echter het dauwpunt van de rookgassen overschrijdt, is het rendement van de condensor gering. Het water in de tank kan 50°C worden opgewarmd van 40 tot 90°C. De grootte van het bedrijf is 1 hectare glas. Voor de dosering wordt als basis 25 m^3 aardgas per ha per uur gebruikt. Een op dit praktijkbedrijf frequent voorkomende wijze van doseren is in **figuur 1** vereenvoudigd weergegeven.

Op de horizontale as zijn de uren en op de verticale as de voor het CO_2 doseren benodigde aantal m^3 aardgas per uur weergegeven. De grafiek is als volgt te vertalen: Tussen 7.00 en 8.00 uur wordt normaal gedoseerd, dus 25 m^3 per ha per uur. De luchtramen zijn nog gesloten en de warmte wordt in de kas afgezet. Tussen 8.00 en 10.00 uur stijgt de temperatuur zodanig dat moet worden gelucht. Hierdoor ontstaan CO_2-verliezen. Om deze verliezen aan te vullen moet meer worden verstookt. Het gemiddelde gasverbruik is daarom op 50 m^3 per ha per uur gesteld. In de grafiek is verder aangenomen dat tussen 10.00 en 11.00 uur de ventilatie nog groter is, waardoor nog meer CO_2 moet worden aangevoerd om de concentratie op een redelijk peil te houden. Van 11.00 tot 14.00 uur is de ventilatie zo groot dat wordt gedoseerd om het buitenniveau te handhaven. Hiertoe wordt 25 m^3 per uur verbruikt. Na 14.00 uur wordt gedoseerd zoals in de grafiek is aangegeven.

De lijnen lopen in de praktijk vloeiender dan in het blokfiguur wordt voorgesteld. Gemiddeld gezien komt het echter wel op hetzelfde neer. Om CO_2 te kunnen doseren wordt tussen 8.00 en 10.00 uur twee keer 50 m^3 aardgas verbruikt. Die warmte moet volledig worden opgeslagen. Tussen 10.00 en 11.00 uur is dat 75 en tussen 11.00 en 14.00 uur 25 m^3. In de namiddag gebeurt hetzelfde in omgekeerde volgorde. De 25 m^3 tussen 17.00 en 18.00 uur wordt voor de opslag niet meegeteld, omdat die warmte voor het op temperatuur houden van de teeltruimten wordt gebruikt.

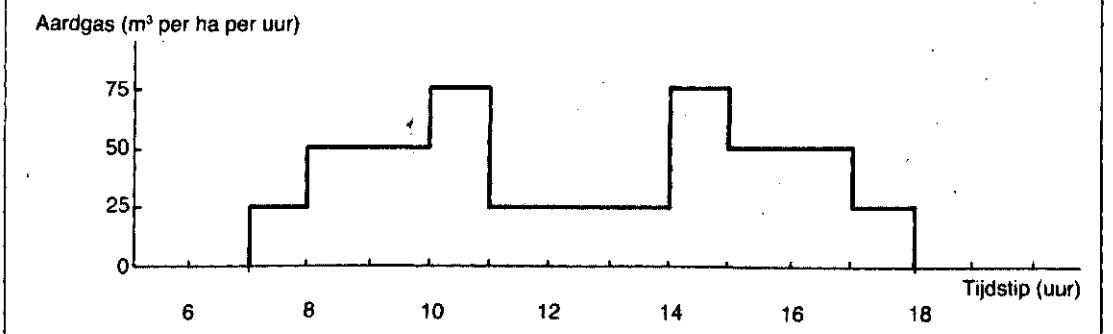
Berekening capaciteit

Met de hiervoor genoemde gegevens kan nu de opslagcapaciteit worden bepaald. Totaal moet per dag kunnen worden opgeslagen: $3 \times 25 + 4 \times 50 + 2 \times 75 = 425$ m^3 aardgas $\times$ 7.000 kcal = 2.975.000 kcal. De watertemperatuur is bij aanvang 40°C. De maximale temperatuur is 90°C. Aan elke liter kan dus 50 kcal worden toegevoegd. De opslagcapaciteit is nu 2.975.000 : 50 = 59.500 liter. Afgerond komt dit neer op een capaciteit van de tank van 60 ton.

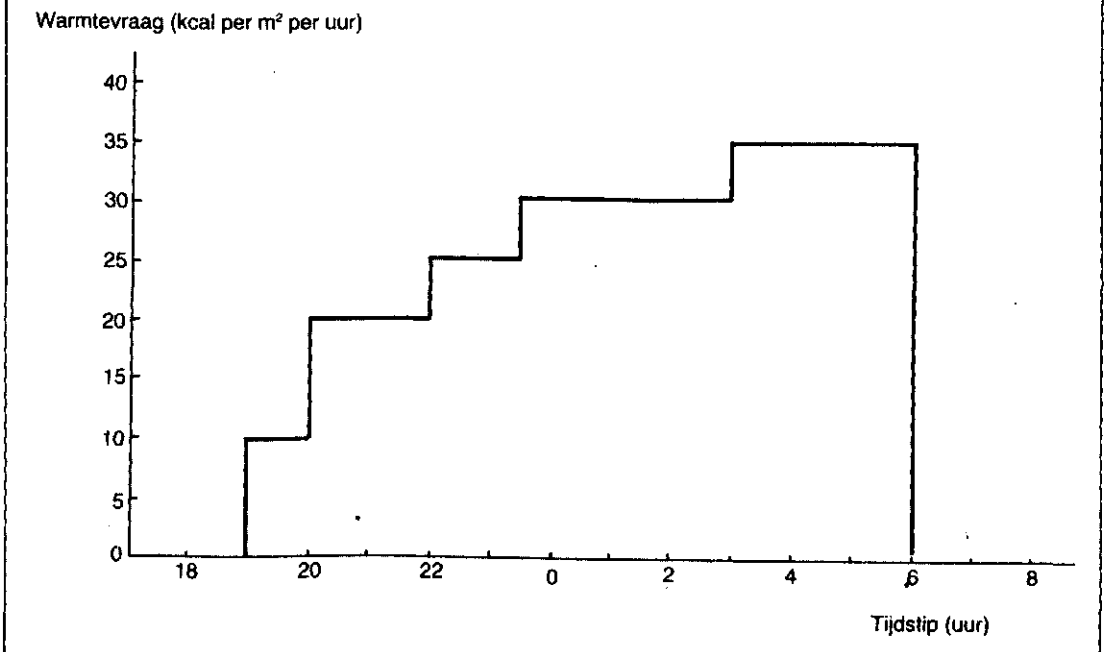
Gebruik van opgeslagen warmte

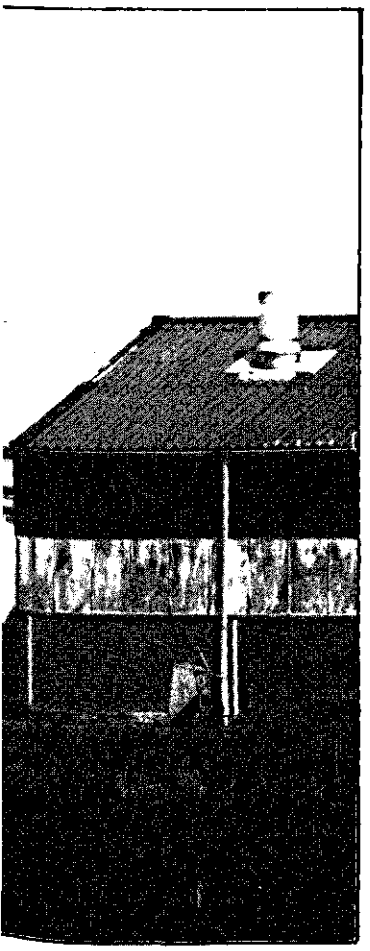
De opslag van warmte hoeft technisch gezien geen problemen te geven. Wil deze opslag echter economisch verantwoord zijn, dan moet de opgeslagen warmte in de daaropvolgende nacht weer worden gebruikt. Liefst met een zo optimaal mogelijke benutting. Wordt de tank niet 'leeg' gemaakt (afgekoeld tot 40°C) of slechts ten dele, dan is de opslagcapaciteit voor de volgende dag kleiner. Dit betekent dan minder

Figuur 1. Een voorbeeld van CO_2-dosering op een praktijkbedrijf



Figuur 2. Warmtevraag gedurende de nacht op een praktijkbedrijf





Een te kleine tank biedt onvoldoende buffercapaciteit. Een te grote tank beperkt de mogelijkheid tot terug levering van de opgeslagen warmte. Bereken van tevoren de benodigde capaciteit

doseeruren of evenveel uren met een lagere concentratie.

In **figuur 2** is aangegeven hoe de warmte gedurende de nacht zou kunnen worden gebruikt. De verticale as geeft de warmtevraag in kcal per m² per uur weer. Op de horizontale as wordt weer de tijd aangegeven. Verondersteld is dat er na 19.00 uur enige warmtevraag is, namelijk 10 kcal per m² per uur. De brander staat stil. Alle warmte wordt volledig geleverd door de opslagtank. Na 20.00 uur neemt de warmtevraag verder toe tot tenslotte 35 kcal per m² per uur van 3.00 tot 6.00 uur. De daarvoor benodigde hoeveelheid warmte is per m² respectievelijk: van 19.00 tot 20.00 uur 10 kcal, van 20.00 tot 22.00 uur 40 kcal, van 22.00 tot 24.00 uur 50 kcal, van 24.00 tot 3.00 uur 90 kcal en van 3.00 tot 6.00 uur 105 kcal. In het totaal is dat 295 kcal per m². Per ha is dat 10.000 × 295 kcal = 2.950.000 kcal.

Ook hier geldt weer dat het verloop van de temperatuur, dus het warmteverlies, geschat is. Door de vele criteria die hierin meespelen, is geen algemeen geldende berekening te maken. Voor meer zicht op de energiebehoefte in de nachtperiode is het aan te raden gedurende een periode het gasverbruik tijdens de nacht bij verschillende buitentemperaturen te noteren.

De hier gegeven cijfers moeten dus niet in absolute zin worden gezien. Het is bedoeld als vergelijkingsmateriaal om na te gaan of het een met het ander in overeenstemming te brengen is. Als het hier gebruikte cijfermateriaal met de praktijk overeenkomt, lijkt een opslagtank van 60 ton per ha een aannemelijke grootte. Bij de hiervoor beschreven berekening is de tankgrootte afgestemd op de bij dit voorbeeld gehanteerde wijze van CO_2 doseren en verwarmen. Mogelijk geeft het leren werken met de warmtebuffer aanleiding tot een betere benutting van de energie. Dit kan aanleiding zijn voor het kiezen van een grotere tank.

Met een warmtetank ook 's zomers CO_2 doseren

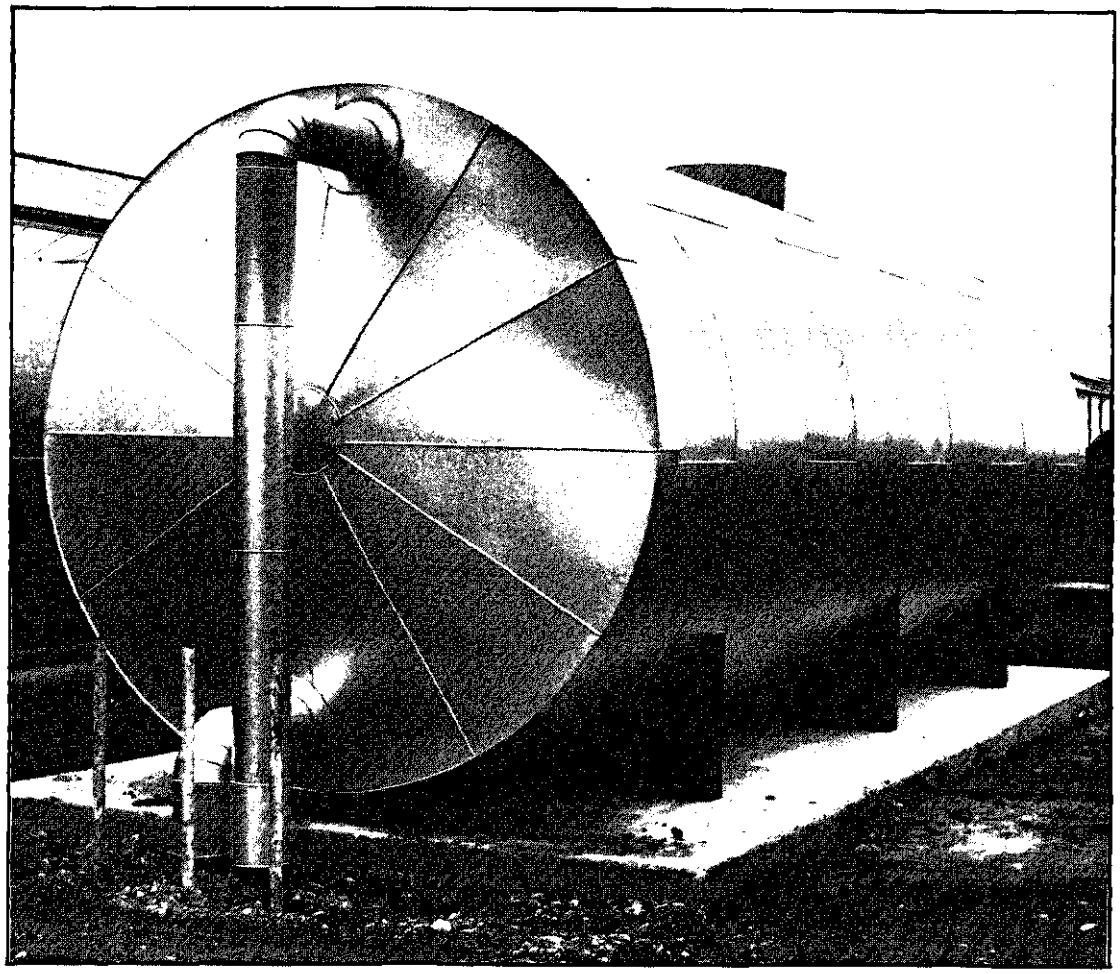
Samenvatting

Hiervoor is een methode voor het berekenen van de benodigde capaciteit van de buffertank gegeven. Bij een berekening 'op maat' zal rekening moeten worden gehouden met specifieke bedrijfsgegevens, zoals CO_2-behoefte van de teelt(en), doseertijden, capaciteit van de gasbrander tijdens het doseren en warmtebehoefte in de nacht.

Met behulp van de beschreven methode kan voor elk bedrijf een redelijke benadering van de gewenste tankcapaciteit worden gevonden.

Kosten en baten CO_2 doseren

Normaal gesproken wordt de CO_2 die bij het verwarmen vrij komt in de kas gebracht. Op deze manier kan het CO_2-gehalte op het gewenste niveau worden gehouden. In de periode november tot maart is de produktie aan warmte overdag groot genoeg om het CO_2-gehalte boven 1.000 dpm te houden. In de periode daarna neemt de produktie aan warmte overdag echter snel af. Bovendien wordt meer geventileerd, waardoor het handhaven van een hoog CO_2-gehalte in de kas niet altijd lukt. Tussen half april en oktober komt het CO_2-gehalte daardoor nogal eens onder het niveau van de buitenlucht – 340 dpm – uit.



Een warmte-opslag van 90 m³ per ha maakt het mogelijk van april tot oktober een relatief hoog CO_2-gehalte aan te houden

Wanneer we toch een hoger niveau in de kas willen handhaven, zal op een andere manier CO_2 in die kas moeten worden gebracht. Daarvoor kan zuivere CO_2 worden gebruikt. Een andere manier is dat we de ketel langer laten branden voor de aanmaak van CO_2, waarbij het teveel aan warmte wordt afgevoerd. Een derde alternatief is het gebruik van een warmtebuffer. Hierbij wordt het teveel aan warmte overdag opgeslagen waarna het 's nachts weer voor het verwarmen van de teeltruimte wordt gebruikt. In dit artikel worden de kosten en baten van deze drie mogelijkheden met elkaar vergeleken. Daarna wordt berekend hoeveel het kost als op deze drie manieren een bepaald minimum CO_2-gehalte in de kas wordt gehandhaafd. Vervolgens wordt berekend welke extra produktie en daarmee extra geldopbrengst met het doseren van CO_2 kan worden gehaald.

Door warmte op te slaan in een tank, kan overdag al de warmte voor de volgende nacht worden geproduceerd. Hierdoor komt overdag extra CO_2 beschikbaar, waarmee het CO_2-gehalte in de kas kan worden verhoogd. Als gevolg van dit hogere gehalte is een hogere produktie en daarmee een hogere geldopbrengst mogelijk.

Aan de andere kant kost het opslaan van warmte ook meer door de benodigde investeringen en het verlies aan rendement bij de opgeslagen warmte. Voordat nu in warmte-opslag wordt geïnvesteerd, moet daarom worden bekeken of de verwachte stijging van dé geldopbrengst groter is dan deze extra kosten.

Wat is de opbrengststijging?

Om de opbrengststijging te kunnen berekenen, moet eerst worden bekeken welk CO_2-gehalte in de kas kan worden gehandhaafd zonder en met warmteopslag. Voor deze berekening moeten we weten hoeveel gas in de verschillende perioden overdag en 's nachts wordt verstookt, zodat bekend is hoeveel CO_2 daarbij vrij komt. Daarnaast moet bekend zijn hoeveel CO_2 de plant zelf opneemt en hoeveel CO_2 door ventilatie uit de kas verdwijnt.

In de berekeningen is voor het gasverbruik gewerkt met cijfers uit de praktijk voor een stookteelt. Voor de ventilatie in de periode april tot oktober werden gegevens van het proefstation Naaldwijk gebruikt. Hiermee is per periode (van vier weken) berekend welke CO_2-gehalten kunnen worden gehandhaafd. Uitgegaan werd van een bedrijf van 10.000 m², waarbij berekeningen voor verschillende situaties zijn gemaakt: Geen warmte-opslag, een opslag van 40 m³ en een opslag van 90 m³.

In **tabel 1** staan de gemiddelde gehalten die voor elke periode zijn berekend. In de eerste kolom vindt u de gehalten die in de kas zouden voorkomen als alleen maar CO_2 in de kas wordt gebruikt die bij de produktie van warmte voor overdag vrij komt. In de tweede en derde kolom

staan de mogelijke gehalten als overdag ook warmte wordt opgeslagen voor de komende nacht in een tank met een inhoud van 40 of 90 m³ per ha.
Zonder warmte-opslag komt de CO_2-concentratie in de kas in periode 5 niet boven 285 dpm, in periode 6 niet boven 280 dpm, in periode 7 niet boven 295 dpm, in periode 8 niet boven 300 dpm en in periode 9 niet boven 305 dpm. Met een warmte-opslag van 40 m³ waterinhoud per ha kan 355 dpm in periode 5, 330 dpm in periode 6, 325 dpm in periode 7, 330 dpm in periode 8 en 345 dpm in periode 9 worden gehandhaafd. Met een warmte-opslag van 90 m³ waterinhoud per ha is dat 450 dpm in periode 5, 370 dpm in periode 6, 330 dpm in periode 7, 330 dpm in periode 8 en 350 dpm in periode 9. Van periode 4 tot en met 11 kan met warmte-opslag een duidelijk hoger CO_2-gehalte in de kas worden gehandhaafd. Bij de opslag van 90 m³ ligt dit weer hoger dan bij een opslag van 40 m³ per ha.
Door deze hogere CO_2-gehalten in de kas kan de produktie stijgen. Het verschil tussen het CO_2-gehalte dat in de huidige situatie gemiddeld in de kas kan worden gehaald zonder dat gebruik wordt gemaakt van de warmte voor de komende nacht en het mogelijke CO_2-gehalte met warmte-opslag bepaalt de stijging van de produktie. Deze produktiestijging is de laatste jaren op het proefstation in Naaldwijk onderzocht.
Voor de berekeningen is uitgegaan van de gevonden produktiestijgingen. In **tabel 1** is daarom voor een buffer van 40 en 90 m³ per ha aangegeven hoeveel de produktie in periode 4 tot en met 11 stijgt door de hogere CO_2-gehalten.
Hieruit blijkt dat het CO_2-gehalte bij een buffer van 40 m³ per ha in periode 7 kan stijgen van 295 dpm naar 325 dpm. Dit maakt een produktiestijging van 8% mogelijk. Op deze manier is voor elke periode bekeken wat de mogelijke produktiestijging is. Deze varieert bij een opslagtank van 40 m³ per ha van 8% in periode 7 en 11 tot 20% in periode 5. Een buffer van 90 m³ per ha maakt nog hogere produktiestijgingen mogelijk, namelijk van 9% in periode 8 tot 37% in periode 5. De som van deze extra produktie in de verschillende perioden heeft in een stookteelt een produktiestijging van 9% per jaar tot gevolg bij een opslagtank van 40 m³ per ha en 14% bij 90 m3 Bij het huidige opbrengstniveau van ongeveer *f* 70,– per m² voor tomaat, paprika en komkommer geeft deze produktiestijging een stijging van de geldopbrengst van 7% bij een opslagtank van 40 m³ per ha en 12% bij 90 m³.

Tabel 1. Gemiddeld haalbare CO_2-gehalte overdag in de kas in verschillende perioden (vier weken) zonder warmte-opslag en met een warmte-opslag van 40 m³ èn 90 m³ per ha

Periode	Haalbare CO_2-gehalten (dpm)			Mogelijke produktiestijging %	
	Geen opslag	40 m³ opslag	90 m³ opslag	40 m³ opslag	90 m³ opslag
4	510	725	995	11	17
5	285	355	450	20	37
6	280	330	370	16	25
7	295	325	330	8	10
8	300	330	330	9	9
9	305	345	350	11	13
10	330	385	425	10	16
11	510	605	725	8	11

Tabel 2. Investeringskosten van bedrijfsuitrusting voor CO_2 doseren, met afschrijvings- en onderhoudspercentage (Bedrijf 10.000 m²)

Investering	Bedrag	% Afschrijving	% Onderhoud
Centrale dosering	van 6.000	10	5
	tot 10.000	10	5
Verdeelleidingen	van 3.500	10	5
	tot 6.000	10	5
Detector en sturing	van 4.000	10	5
	tot 5.000	10	5
Regeling ketelwater	5.000	10	5
Geïntegreerde verwarmings- en opslagketel (ROWO)	50.000	10	5
CO_2-ketel 25 m³ gas/uur	25.000	10	5
CO_2-generator hetelucht 18 tot 40 m³ gas/uur	20.000	10	5
Warmwateropslag 10 m³	15.500	10	1
30 m³	23.000	10	1
40 m³	30.000	10	1
50 m³	32.500	10	1
90 m³	45.000	10	1

Prijzen van januari 1987

Wat kost het?

Het doseren van CO_2 met de opslag van warmte brengt de volgende extra kostenposten met zich mee:
- Rente, afschrijving en onderhoud van de opslagtank.
- Extra elektriciteit voor de ventilator.
- Extra gas in verband met het verlies aan warmte tijdens de opslag.

Dit extra gas is nodig omdat een deel van de warmte verloren gaat tijdens het opslaan tot de volgende nacht. Wanneer de opslag 80% rendement oplevert, kost dit voor een opslagtank van 40 m³ en 90 m³ respectievelijk 16.000 en 24.000 m³ extra gas per jaar.
In **tabel 2** vindt u een overzicht van de investeringen die nodig zijn voor de aanleg van een CO_2-installatie en een opslagtank met de daarbij horende afschrijvings- en onderhoudspercentages. Deze tabel is als indicatie bedoeld, omdat de investeringen sterk afhangen van de situatie op het bedrijf.

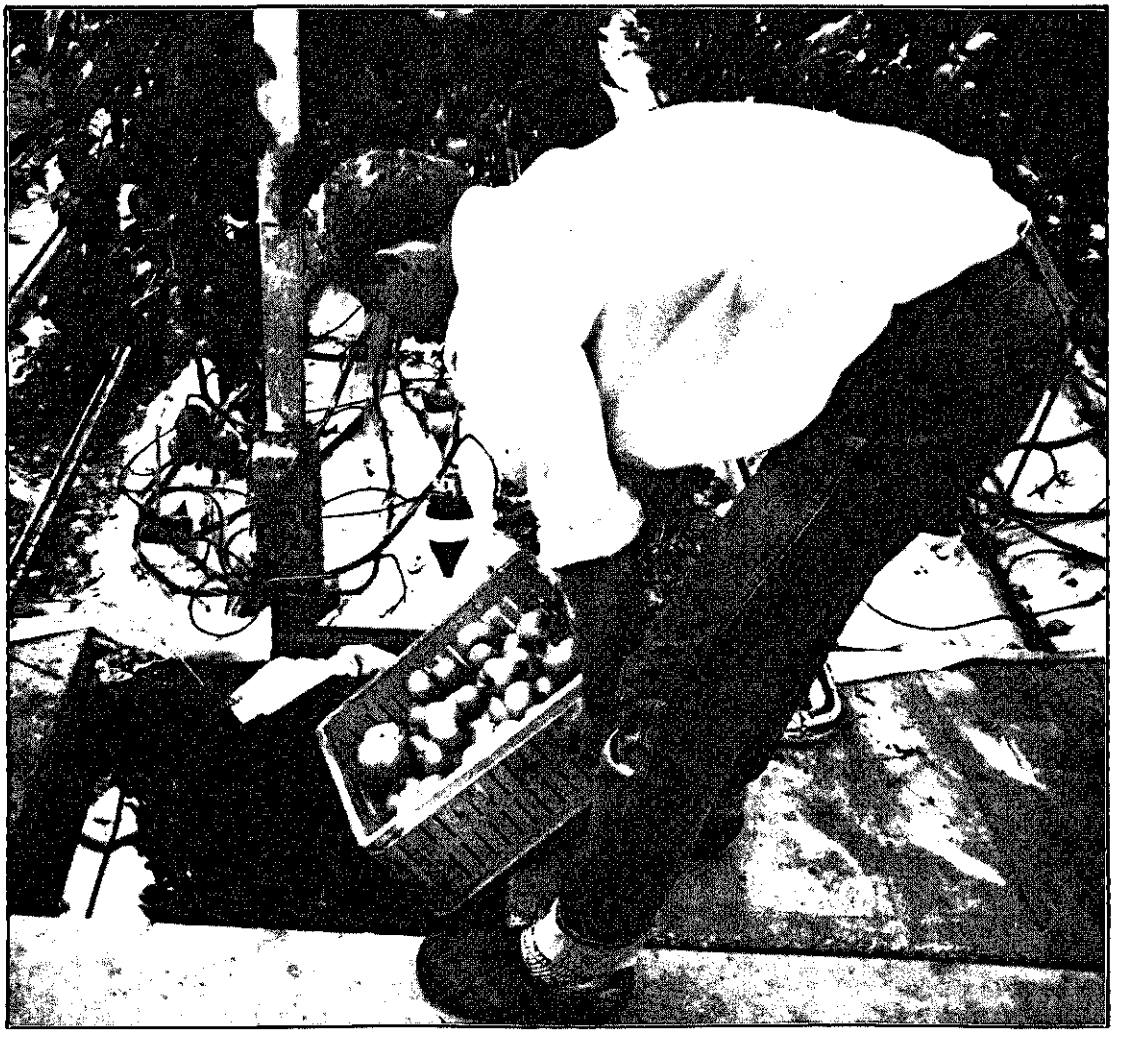
In **tabel 3** is voor een bedrijf van 10.000 m² aangegeven wat de kosten van het CO_2 doseren zijn. In de eerste kolom staat de gewone situatie zonder dat een opslagtank wordt gebruikt. In de tweede en derde kolom staan de kosten bij het gebruik van een opslagtank van 40 respectievelijk 90 m³ per ha. Op de eerste regel vindt u de kosten voor rente, afschrijving en onderhoud van de CO_2-installatie. Voor de CO_2-installatie is een investeringsbedrag van *f* 15.000,– aangehouden, voor de opslagtank van 40 en 90 m³ respectievelijk *f* 30.000,– en *f* 45.000,–.
De totale kosten per jaar zijn in de situatie waarbij geen opslagtank wordt gebruikt *f* 3.500,–, voor een opslagtank van 40 m³ *f* 11.500,– en voor een van 90 m³ *f* 15.500,–. De extra kosten voor warmte-opslag zijn dan respectievelijk *f* 8.000,– en *f* 12.000,–. Op de tweede regel van tabel 3 staan deze kosten voor de opslagtank en op de derde regel de kosten voor het extra

Tabel 3: Jaarkosten van doseren CO_2 die vrij komt bij produktie van warmte overdag zonder warmte-opslag en met een warmte-opslag van 40 m³ en 90 m³ voor een bedrijf van 10.000 m² (gasprijs 20 cent per m³)

Kosten	Geen opslag	40 m³ opslag	90 m³ opslag
CO_2-installatie	2.300	2.300	2.300
Opslagtank	—	4.500	6.800
Extra gas	—	3.200	4.800
Elektriciteit	1.200	1.500	1.600
Totaal	3.500	11.500	15.500
Bij gas 40 ct/m³:			
Extra gas	—	6.400	9.600
Totaal	3.500	14.700	20.300

Buffer van 90 m³ bedrijfseconomisch rendabel

gas bij een gasprijs van 20 cent per m³. Op de vierde regel staan de kosten voor elektriciteit.
Het is pas zinvol een opslagtank aan te schaffen als het verschil tussen de kosten van de huidige installatie en de kosten van het doseren met warmte-opslag kleiner is dan de extra opbrengststijging. In de situatie met 40 m³ opslag moet *f* 8.000,– per jaar meer worden geproduceerd en bij 90 m³ is dat *f* 12.000,– per jaar. Omdat deze extra produktie ook extra arbeids- en afzetkosten met zich mee brengt, moeten deze bedragen nog hoger zijn. Bij het huidige opbrengstniveau van *f* 70,– per m² moeten de opbrengsten minstens met respectievelijk 1,5% en 2,5% stijgen om deze extra kosten goed te maken. Dit moeten we vergelijken met de berekende opbrengststijging ten opzichte van de situatie zonder warmte-opslag, die respectievelijk 7 en 12% bedraagt voor 40 en 90 m³. Dit biedt duidelijk perspectief voor de warmte-opslag. Bij een opslagtank van 40 m³ per ha is het verschil tussen de extra kosten en de opbrengsten 5,5% en bij 90 m³ per ha is dat 9,5%. Een grotere opslag levert dus betere resultaten op.
In de kosten van de warmte-opslag zit ook een deel aan gas-kosten in verband met de verliezen aan rendement. Om het effect van een hogere gasprijs te bekijken, zijn deze berekeningen ook gemaakt voor een gasprijs van 40 cent per m³. In de laatste regel van **tabel 3** staan de uitkomsten bij deze gasprijs. De totale kosten stijgen in dat geval bij een buffer van 40 m³ per ha en 90 m³ tot respectievelijk *f* 14.700,– en *f* 20.300,– per jaar. Hierdoor is bij een gasprijs van 40 cent een hogere opbrengststijging nodig om de extra kosten van de warmte-opslag goed te maken. Bij die gasprijs is voor een rendabele investering in een buffer van 40 of 90 m³ per ha minimaal respectievelijk 2 en 3% opbrengststijging nodig. Ook dit is haalbaar.
We kunnen wel vaststellen dat door het gebruik van warmte-opslag een hoger CO_2-gehalte in de kas mogelijk is. Een grotere warmte-opslag van april tot oktober maakt een hoger CO_2-gehalte mogelijk. Deze hogere CO_2-gehalten geven voldoende opbrengststijging om de extra kos-

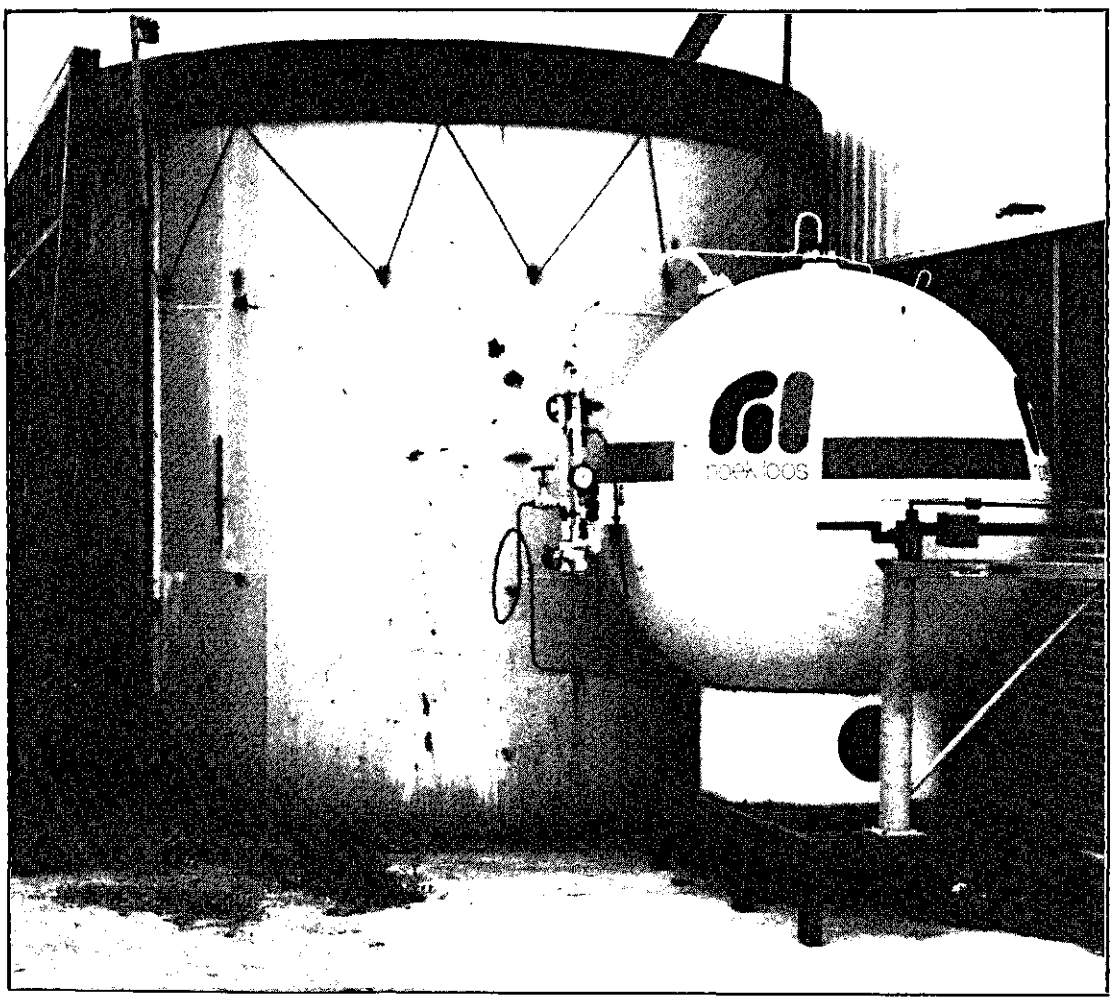


ten voor de warmte-opslag goed te maken. Een hogere gasprijs maakt wel een hogere opbrengststijging nodig, maar die lijkt wel te kunnen worden gerealiseerd. Een opslagtank met een inhoud van 90 m³ per ha maakt de grootste stijging van het bedrijfsresultaat mogelijk.

Afhankelijk van de periode kan met een warmtebuffer van 90 m³ een opbrengststijging van 9 tot 37% worden gerealiseerd

Wat kost het aanhouden van 340, 400 of 500 dpm?

Met de extra CO_2 die door het gebruik van warmte-opslag vrijkomt, kan het CO_2-gehalte in de kas worden verhoogd. Het CO_2-gehalte dat op deze manier kan worden gerealiseerd, ligt echter de hele zomer beneden de 400 dpm. Om de kosten van aanhouden van minimaal 340 dpm, 400 dpm, 500 dpm of 600 dpm CO_2 in de kas te kunnen berekenen, moet eerst worden vastgesteld hoeveel extra CO_2 er in de verschillende perioden per uur nodig is. Hierbij wordt het doseren van extra CO_2 uit aardgas en zuivere CO_2 met elkaar vergeleken. Bovendien wordt gekeken wat de effecten en mogelijkheden zijn als gebruik zou worden gemaakt van een warmtebuffer met een inhoud van 90 m³ op een bedrijf van 10.000 m².



Zuivere CO_2 is nog altijd duur in vergelijking met CO_2 uit aardgas

Hoeveel CO_2 er per uur in de kas moet worden gebracht, hangt nauw samen met de opname door het gewas en de hoeveelheid die door ventilatie de kas verlaat. De opname van het gewas varieert van 1 tot maximaal 100 kg per uur per ha. De gewasomvang, het CO_2-gehalte en de hoeveelheid licht spelen daarbij een belangrijke rol. Het gewas zal 's zomers bij helder weer naar verhouding veel CO_2 opnemen. Het verlies door ventilatie hangt af van het verschil tussen het CO_2-niveau in de kas en het niveau in de buitenlucht. Hoe groter dit verschil is, hoe meer er verloren gaat. Daarnaast is dit verlies ook afhankelijk van de luchtuitwisseling ofwel het ventilatievoud. Daarmee wordt de frequentie bedoeld waarmee de kaslucht per uur wordt ververst. Het ventilatievoud kan variëren van minder dan één keer per uur in de winter tot dertig keer op een zomerdag.

In **tabel 1** is in de eerste vier kolommen aangegeven hoeveel kg CO_2 per ha in de kas moet worden gebracht om een gehalte van respectievelijk 340, 400, 500 en 600 dpm in de kas te realiseren. Uit deze tabel blijkt dat in de zomer grote hoeveelheden CO_2 in de kas moeten worden gebracht. Daarnaast is in de vijfde kolom weergegeven hoeveel CO_2 er bij de verwarming overdag gemiddeld vrijkomt, terwijl de zesde kolom de hoeveelheid CO_2 laat zien die beschikbaar komt als van een warmtebuffer gebruik wordt gemaakt. Het seizoen is onderverdeeld in perioden van vier weken. Van periode 11 tot en met periode 4 is de beschikbare hoeveelheid CO_2 voldoende om het CO_2-gehalte in de kas minimaal op het buitenluchtgehalte van 340 dpm te houden. In de perioden daarna lukt dit niet meer. Wanneer echter gebruik wordt gemaakt van een warmtebuffer komt het CO_2-gehalte alleen in periode 7 en 8 onder de 340 dpm te liggen. Om gehalten tot minimaal 340 dpm te handhaven, moet dus met en zonder warmteopslag extra CO_2 in de teeltruimte worden gebracht. Deze extra hoeveelheid is bij een warmteopslag van 90 m³ per ha duidelijk lager dan wanneer er geen mogelijkheid voor warmte-opslag beschikbaar is.

Wat kost aanvullend doseren?

In **tabel 2** zijn de kosten weergegeven voor de situaties waarin CO_2-gehalten van minimaal 340, 400 en 500 dpm worden aangehouden. De hoeveelheden CO_2, die in de zomer moeten worden geproduceerd om een concentratie van 600 dpm CO_2 te handhaven, zijn zo groot dat dit met een ketel van 200 kcal per m² niet haalbaar is. Daarom is dit alternatief in de verdere berekeningen niet meer meegenomen.

Bij het berekenen van de kosten werd bovendien gekeken naar de kosten van vier verschillende methoden om het gewenste CO_2-niveau te realiseren.

- Het doseren van CO_2 waarbij de warmtproduktie wel of niet nuttig kan worden aangewend. In het laatste geval wordt het overschot aan warmte afgevoerd via de luchtramen. (geen opslag).

Kosten doseren berekend met of zonder warmtebuffer.

Tabel 1. Gemiddelde CO_2-gift per daglichtuur om respectievelijk het 340, 400, 500 en 600 dpm niveau te handhaven inclusief de opname door de plant (kg CO_2 per uur per ha)

	Nodig voor minimaal				Beschikbaar	
	340 dpm	400 dpm	500 dpm	600 dpm	Geen opslag	90 m³ opslag
Periode 1	15	20	28	36	252	409
Periode 2	25	30	38	46	207	341
Periode 3	35	40	48	56	163	275
Periode 4	50	62	82	102	84	181
Periode 5	55	87	140	192	26	112
Periode 6	60	99	164	229	20	78
Periode 7	60	131	248	366	9	47
Periode 8	55	127	246	365	9	45
Periode 9	50	114	220	327	13	59
Periode 10	40	90	174	258	32	112
Periode 11	25	59	115	171	121	241
Periode 12	15	25	41	57	176	320
Periode 13	10	15	23	31	245	409

Ter vergelijk: 45 kg CO_2 per uur per ha komt overeen met 25 m³ gas verbranden per uur per ha

- De CO_2 van de ketel, aangevuld met zuivere CO_2 als er geen warmtevraag is. (geen opslag + zuivere CO_2).
- De CO_2 van de ketel, waabij de warmte die in de teeltruimte niet nuttig kan worden aangewend, wordt gebufferd in een warmte-opslagtank met een inhoud van 90 m³ per ha. (90 m³ opslag).
- Deze situatie is vergelijkbaar met de vorige, met dit verschil dat wanneer de buffer 'vol' zit, wordt overgeschakeld op het doseren van zuivere CO_2. (90 m³ opslag + zuivere CO_2).

Bij het doorrekenen van deze alternatieven wordt rekening gehouden met de jaarkosten (rente, afschrijving en onderhoud) van de CO_2-installatie en de warmwateropslag, de extra kosten voor energie als gevolg van de rendementsverliezen van de warmte-opslag, de energiekosten voor de aanvullende CO_2-produktie, de kosten (40 cent per kg) voor zuivere CO_2 en extra elektriciteit.

Het zal duidelijk zijn dat de kosten toenemen naarmate een hoger minimum CO_2-gehalte wordt aangehouden. In de situatie zonder warmte-opslag stijgen de kosten van ƒ 14.600,– bij 340 dpm tot ƒ 55.600,– bij minimaal 500 dpm. Bij gebruik van een warmtebuffer liggen de kosten bij minimaal 340 dpm iets hoger en wel op ƒ 17.000,– en stijgen bij een minimum niveau van 500 dpm tot ƒ 51.400,–. Dit betekent dus dat er van een duidelijk voordeel sprake is in vergelijking met het doseren tot minimaal 500 dpm zonder warmte-opslag.

Zonder warmte-opslag eisen de energiekosten het grootste deel van de totale kosten voor zich op. In het geval waarin de warmte wordt gebufferd, ligt het accent op de jaarkosten van de installatie. Hierdoor zijn de kosten voor doseren met warmte-opslag minder afhankelijk van de gasprijs. Om een idee te krijgen van de invloed van de gasprijs zijn in tabel 2 voor elke situatie ook de totale jaarkosten bij een gasprijs van 40 cent per m³ weergegeven. Hieruit blijkt dat bij een gasprijs van 40 cent per m³ de totale jaarkosten, wanneer minimaal naar 400 of 500 dpm wordt gestreefd, met ongeveer 60 tot 90% stijgen. Wanneer het gewenst is het CO_2-gehalte minimaal op 340, 400 of 500 dpm te handhaven, blijkt een warmtebuffer interessant te zijn. Zuivere CO_2 is in alle gevallen duurder dan het doseren van CO_2 uit aardgas. Zuivere CO_2 geldt als een interessant alternatief bij een prijs van ongeveer 10 cent per kg.

In het kort

De berekeningen rechtvaardigen de volgende conclusies. Wanneer wordt gedoseerd tot minimaal 400 dpm en 500 dpm is een warmte-opslag van 90 m³ altijd goedkoper dan wanneer dit zonder warmte-opslag gestalte moet worden gegeven. Bij een gasprijs boven 30 cent per m³ is warmte-opslag altijd goedkoper dan het doseren zonder warmte-opslag. Het doseren van zuivere CO_2 is alleen goedkoper bij een prijs van maximaal 10 cent per kg zuivere CO_2.

Tabel 2. Kosten van CO_2 doseren tot minimaal 340, 400 en 500 dpm, zonder en met warmwateropslag van 90 m³ per ha, in guldens per jaar per 10.000 m². Bij een gasprijs van 20 ct per m³

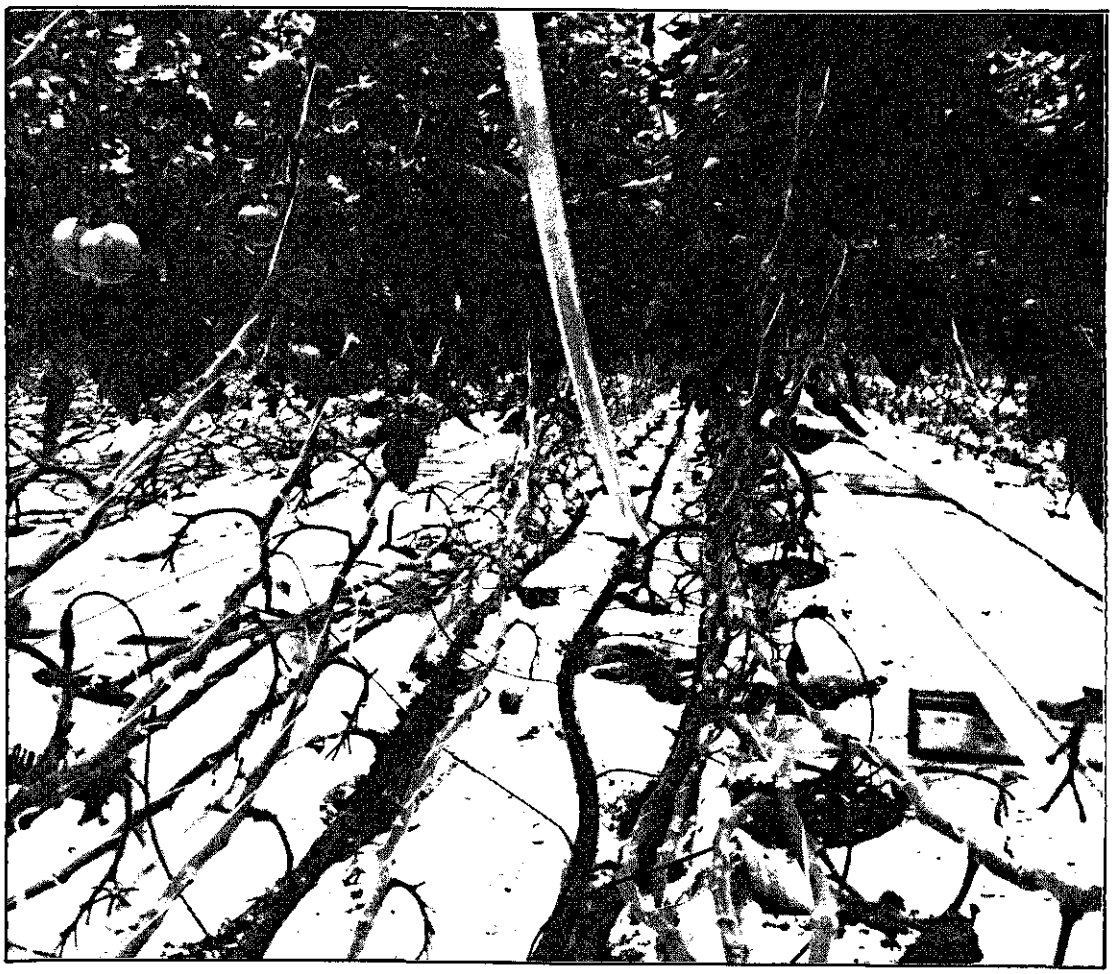
Voor het doseren tot minimaal 340 dpm:	Geen opslag	Geen opslag + zuiver	90 m³ opslag	90 m opslag + zuiver
CO_2-installatie	2300	2300	2300	2300
Warmte-opslag	–	–	6800	6800
Gas voor opslagverlies	–	–	4800	4800
Gas voor aanvullen CO_2	10400	–	1200	–
Zuivere CO_2	–	31700	–	4300
Elektriciteit	1900	1900	1900	1900
Totaal	14600	35900	17000	20100
Bij gasprijs 40 ct/m³: Totaal	25000	35900	23000	24900

Voor het doseren tot minimaal 400 dpm:	Geen opslag	Geen opslag + zuiver	90 m³ opslag	90 m³ opslag + zuiver
CO_2-installatie	2300	2300	2300	2300
Warmte-opslag	–	–	6800	6800
Gas voor opslagverlies	–	–	4800	4800
Gas voor aanvullen CO_2	25600	–	11800	–
Zuivere CO_2	–	92200	–	42500
Elektriciteit	1900	1900	1900	1900
Totaal	29800	96400	27600	58300
Bij gasprijs 40 ct/m³: Totaal	55400	96400	44200	63100

Voor het doseren tot minimaal 500 dpm:	Geen opslag	Geen opslag + zuiver	90 m³ opslag	90 m³ opslag + zuiver
CO_2-installatie	2300	2300	2300	2300
Warmte-opslag	–	–	6800	6800
Gas voor opslagverlies	–	–	4800	4800
Gas voor aanvullen CO_2	51400	–	35600	–
Zuivere CO_2	–	18500	–	128200
Elektriciteit	1900	1900	1900	1900
Totaal	55600	189200	51400	144000
Bij gasprijs 40 ct/m³: Totaal	107000	189200	91800	148000

Extra produktie bij 340, 400 en 500 dpm

Tegenover de extra kosten van het aanhouden van CO_2-gehalten van minimaal 340, 400 of 500 dpm moet minstens een even hoge stijging van de geldopbrengst staan. Wat is nu het effect van deze minimale gehalten op de produktie. Om de produktiestijging te kunnen berekenen, moet worden berekend hoeveel het CO_2-gehalte stijgt ten opzichte van de huidige situatie. Op veel bedrijven wordt volstaan met het doseren van de CO_2 die vrijkomt als er wordt gestookt. Door vast te stellen welke gehalten in dezen worden bereikt, is het mogelijk de produktiestijging – mede op basis van gegevens van het onderzoek – te bepalen.



Een eenvoudig rekensommetje leert dat de meerproduktie opweegt tegen de jaarkosten van de CO_2-installatie (inclusief buffer)

tabel 1 staan in de eerste twee kolommen de CO_2-concentraties die worden gehaald wanneer er respectievelijk geen of wel een warmtebuffer van 90 m³ per ha op het bedrijf aanwezig is. In het laatste geval kan natuurlijk het hele jaar een hoger CO_2-gehalte worden gehandhaafd.

De derde en vierde kolom van deze tabel laten het CO_2-gehalte zien dat in de verschillende perioden wordt gehandhaafd als een concentratie van minimaal 340 dpm het streven is. Bij gebruik van een warmtebuffer van 90 m³ ligt het CO_2-gehalte alleen in de perioden 7 en 8 net op 340 dpm. Zonder warmte-opslag moet daarentegen van periode 5 tot en met 10 aanvullend worden gedoseerd. Het overige deel van de tabel laat hetzelfde zien, maar dan voor 400 en 500 dpm als het minimaal na te streven gehalte.

Produktiestijging van 8 tot 26%

De stijging van de produktie kan worden berekend door in elke periode het verschil te bepalen tussen de CO_2-gehalten in de situatie waarin wel of niet aanvullend wordt gedoseerd. Als voorbeeld kijken we naar periode 5 in de situatie waarin 340 dpm als minimum geldt.

Zonder warmte-opslag zal daarvoor extra moeten worden gedoseerd tot 340 dpm, omdat anders het gehalte op gemiddeld 285 dpm blijft steken. Deze toename met 55 dpm maakt voor die periode een produktiestijging van 16% mogelijk.

Met een warmtebuffer van 90 m³ bedraagt het CO_2-niveau gemiddeld 450 dpm. Dit betekent in vergelijking met de situatie waarin 340 dpm niet als minimum zou gelden een stijging van 165 dpm. Dit verschil komt volgens gegevens van het onderzoek overeen met een produktiestijging van 37%.

Als voor elke periode op deze manier de produktiestijging wordt berekend, kan de totale produktiestijging voor alle situaties worden bepaald. In **tabel 2** wordt de toename van de produktie aangegeven als een bepaald minimum CO_2-gehalte (340, 400 of 500 dpm) wordt aangehouden. De vergelijking is die met de situatie waarin alleen CO_2 wordt gedoseerd als er wordt gestookt.

Wanneer het hele jaar een minimum CO_2-concentratie van 340 dpm wordt aangehouden, is op jaarbasis al een produktiestijging van 8% mogelijk. Wanneer een minimum gehalte wordt aangehouden van 400 en 500 dpm gaat het om een stijging van respectievelijk 14 en 23%.

Door de extra produktie in de verschillende perioden te vermenigvuldigen met de prijs in die periode, kan de totale stijging van de geldopbrengst worden berekend. De toename van de geldopbrengst is lager dan op grond van de hogere produktie zou worden verwacht. Dit wordt veroorzaakt doordat een groot deel van de extra produktie in de zomer wordt gerealiseerd en in de zomer doorgaans sprake is van een matige prijsvorming. De percentages waarmee de geldopbrengst bij de verschillende CO_2-gehalten toeneemt, zijn eveneens in tabel 2 opgenomen.

Tabel 1. Gemiddeld haalbare CO_2-gehalte overdag in de kas zonder warmte-opslag en met een warmte-opslag met 90 m³ water per ha

Periode	CO_2-gehalten haalbaar (dpm)		Gemiddeld CO_2-gehalte bij het handhaven van minimaal:					
			340 dpm		400 dpm		500 dpm	
	Geen opsl.	90 m³ opsl.	Geen opsl.	90 m³ opsl.	Geen opsl.	90 m³ opsl.	Geen opsl.	90 m³ opsl.
4	510	995	510	995	510	995	510	995
5	285	450	340	450	400	450	500	500
6	280	370	340	370	400	400	500	500
7	295	330	340	340	400	400	500	500
8	300	330	340	340	400	400	500	500
9	305	350	340	350	400	400	500	500
10	330	425	340	425	400	425	500	500
11	510	725	510	725	510	725	510	725

Tabel 2. Stijging van de produktie en geldopbrengst ten opzichte van de huidige situatie waarbij alleen de CO_2 die vrijkomt bij de verwarming wordt gedoseerd

	Minimaal CO_2-gehalte		
	340 dpm	400 dpm	500 dpm
Geen warmte-opslag			
Stijging produktie	8	14	23
Stijging geldopbrengst	6	10	17
Warmte-opslag 90 m³			
Stijging produktie	15	18	26
Stijging geldopbrengst	12	14	19

Wanneer van deze minimum gehalten wordt uitgegaan, maar het CO_2-gehalte in het voor- en najaar extra wordt verhoogd door gebruik te maken van warmteoplag, dan hoort een hogere opbrengst tot de mogelijkheden. Op deze manier zou een produktiestijging van 15% (340 dpm), 18% (400 dpm) en 26% (500 dpm) mogelijk zijn. De warmtebuffer wordt in dit geval meer optimaal benut.

Vergelijking van extra kosten en opbrengsten

Om nu eens te bekijken wat per saldo aan het doseren van CO_2 wordt overgehouden, geven we een voorbeeld.

Stel dat op jaarbasis een opbrengst van *f* 70,– per m² wordt gerealiseerd, ofwel *f* 700.000,– per ha. Bij het handhaven van een minimum CO_2-gehalte zonder dat daarbij een warmtebuffer wordt gebruikt, hoort een 6% hogere opbrengst tot de mogelijkheden (tabel 2). Van de meeropbrengst van *f* 42.000,– moet op grond van de extra arbeids- en afzetkosten (20%) nog eens *f* 8.400,– worden afgetrokken. Er blijft dan dus een bedrag over van *f* 33.600,–.

Voor het handhaven van minimaal 400 en 500 dpm komen hier bedragen uitrollen van respectievelijk *f* 56.000,– en *f* 95.200,–.

Hetzelfde rekensommetje kan worden gemaakt voor de situatie waarin voor het aanhouden van een minimum CO_2-gehalte ook een warmtebuffer wordt ingezet, wat – zoals uit de voorgaande bijdrage blijkt – resulteert in een gemiddeld hoger CO_2-niveau in de teeltruimte. Wanneer met een warmtebuffer van 90 m³ minimale gehalten van 340, 400 of 500 dpm worden nagestreefd, worden geldopbrengsten gerealiseerd die respectievelijk 12, 14 en 19% hoger zijn. Daarbij is de vergelijking getrokken met de situatie waarin niet aanvullend wordt gedoseerd.