

# **Onkruidbestrijding met infrarode straling op verhardingen**

## **Deel 2: Stralingsdosis - effect relatie bij gele mosterd (*Sinapis alba* L.)**

**D.A.G. Kurstjens & G.D Vermeulen**

Augustus 2000

Nota P 2000-56

## Voorwoord

Het gebruik van herbiciden voor onkruidbestrijding op verhardingen is maatschappelijk steeds minder acceptabel omdat het nadelige milieu-effecten kan hebben. Thermische onkruidbestrijdingstechnieken bieden mogelijkheden om het herbicidegebruik te verminderen. De beperkte effectiviteit van de gangbare apparatuur en de daarmee verbonden hogere kosten en bestrijdingsfrequentie vormen echter een belangrijke belemmering voor een bredere toepassing. Het in dit rapport beschreven onderzoek betreft het vaststellen van de bestrijdingseffectiviteit van onkruidverhitting door middel van gefocusseerde infrarode straling. Tevens wordt de effectiviteit van gefocusseerde infrarode straling vergeleken met de gerapporteerde effecten van een gangbare onkruidbrander.

Het onderzoek is uitgevoerd in het kader van DLO/PO programma “Beheersing en bestrijding van onkruiden” (Programma 343, thema 1e, “Innovatieve fysische technieken voor bestrijding”, project 51017). Dit door het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij gefinancierde onderzoek is gericht op het verminderen van de afhankelijkheid en het gebruik van chemische middelen voor de bestrijding van onkruiden.

De ideeën van ir. R.P. van Zuydam over het gebruiken van gefocusseerde infrarode straling waren van grote waarde voor dit onderzoek. De auteurs willen mw. F. Moroso bedanken voor haar hulp bij de uitvoering van de experimenten en de leerstoelgroep Bodemtechnologie van Wageningen Universiteit voor het ter beschikking stellen van hun onderzoeksfaciliteiten.

Ir. A.A. Jongebreur  
directeur

## Inhoud

<b>Samenvatting</b>		4
<b>1 Inleiding</b>		5
1.1	Probleem	
1.2	Onderzoek ter verbetering van thermische onkruidbestrijdingstechnieken	
1.3	Doel	
<b>2 Materialen &amp; methoden</b>		7
2.1	Planten	
2.2	IR-straler	
2.3	Proefopzet	
2.4	Werkwijze	
2.5	Effectbepaling	
<b>3 Resultaten en discussie.</b>		13
<b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>		18
<b>Referenties</b>		19
<b>Summary</b>		20

## Samenvatting

Bij thermische onkruidbestrijding wordt alleen het bovengrondse deel van planten beschadigd. Door de vaak onvolledige bestrijding moet de bestrijding worden herhaald, om uiteindelijk een effect te behalen wat vergelijkbaar is met dat van een enkele chemische bestrijding. De hogere kosten van thermische onkruidbestrijding belemmeren een bredere toepassing. Het ontwikkelen van efficiënte apparatuur met een grotere effectiviteit en capaciteit is dus van groot belang. Met dit doel is de relatie tussen stralingsdosis en bestrijdingseffect bij energieoverdracht met infrarode (IR) straling onderzocht. De energie-efficiëntie bij dit experiment met IR straling werd vergeleken met de gerapporteerde efficiëntie van onkruidbranders in veldproeven.

Het in dit rapport beschreven laboratoriumexperiment kwantificeert de IR stralingsdosis – effect relatie voor gele mosterd (*Sinapis alba* L.). De in een kas opgekweekte planten werden bestraald in het vroege twee-blad stadium, waarbij het bladoppervlak ca. 4 cm<sup>2</sup> per plant omvatte en de stengeldiameter 1.2 mm was. Er werd een elektrische infraroodstraler met een elliptische reflector (IRT LE500-2kW) gebruikt, die een brandlijn heeft met een piek-stralingsdichtheid van 125 kW/m<sup>2</sup>. Planten werden op twee manieren bestraald: 1) bestraling van gehele planten van bovenaf met een piek-stralingsdichtheid van 25 kW/m<sup>2</sup>, en 2) bestraling van de stengel in de brandlijn van de straler. Dertien dagen na de bestraling werd het effect op vier manieren vastgelegd: 1) het percentage planten met een dood groeipunt, 2) het percentage planten waarvan het blad grotendeels (>95%) dood is, 3) de versgewichtschaade en 4) de groeireductie op basis van het droog plantgewicht.

Bij bestraling van bovenaf met een energiedosis van 300 kJ/m<sup>2</sup> waren er enkele planten met een dood groeipunt, terwijl bij 65% van de planten het blad dood was. Hierbij bedroeg de versgewichtschaade 80%. De benodigde energiedosis voor 50% versgewichtschaade was 109 kJ/m<sup>2</sup>, terwijl 50% doding van de groeipunten 863 kJ/m<sup>2</sup> (346 J / plant) vergde. Bij de laatstgenoemde dosis was het aan straling blootgestelde blad dood en bedroeg de groeireductie ongeveer 90%. Bij een dosis van ca. 1200 kJ/m<sup>2</sup> (480 J / plant) werden planten volledig gedood en was de groeireductie 100%.

Bij een energiedosis van 300 kJ/m<sup>2</sup> werden de aan de brandlijn blootgestelde stengels over een lengte van 3 mm verschrompeld. Hoewel deze planten onder normale groeiomstandigheden zouden zijn gestorven, bleef het blad groen vanwege de koele en vochtige groeiomstandigheden in de kas tijdens de winter. Daardoor waren de versgewichtschaade en groeireductie relatief klein.

De in veldexperimenten gebruikte gasgestookte stootbranders en IR-stralers verhitten onkruid door een combinatie van convectie (hete lucht) en straling, terwijl er in dit experiment geen convectieve energieoverdracht plaats had. Als men de energiedosis vergelijkt waarbij 50% versgewichtschaade van gele mosterd optreedt, dan is verhitting door pure IR straling minder efficiënt dan de onkruidbranders in veldexperimenten. In vergelijking met energieoverdracht door convectie is straling echter gemakkelijker te focuseren op gewasrijen, onkruidplekken, individuele planten of specifieke delen van planten. Daarom biedt plaats specifieke of precisie verhitting door gefocusseerde IR straling wellicht perspectief voor de verbetering van de energie-efficiëntie en capaciteit van apparatuur voor thermische onkruidbestrijding.

# 1 Inleiding

## 1.1 Probleem

Borstelmachines en branders zijn op dit moment de meest toegepaste alternatieven voor chemische onkruidbestrijding op parkeerplaatsen, trottoirs, bedrijfsterreinen en andere (half) verhardingen. Daarnaast worden ook wel bosmaaiers en heet-water installaties toegepast. Een grootschalige omschakeling op deze alternatieven wordt vooral belemmerd door de hogere totale kostprijs van een werkpakket per m<sup>2</sup> per jaar. Een enkele borstelbehandeling is over het algemeen duurder dan een werkgang met een stootbrander (resp.  $f$  0,09 –  $f$  0,35 per m<sup>2</sup> en  $f$  0,05 –  $f$  0,09 per m<sup>2</sup>; Spijker *et al.*, 1998; zie ook Sluijsmans & Hoksbergen, 1992; Hoksbergen & Jager, 1985; Augustin, 1990) maar is effectiever in zwaar begroeide situaties met grond op de verharding (Sluijsmans & Hoksbergen, 1992). Een pleksgewijze bespuiting (select-spray) met herbicide kost  $f$  0,02 –  $f$  0,08 per m<sup>2</sup> (Spijker *et al.*, 1998). Het prijsverschil tussen een chemisch werkpakket en een werkpakket met niet-chemische methoden hangt voor een belangrijk deel samen met de hogere benodigde bestrijdingsfrequentie van niet-chemische methoden. Omdat zowel alle genoemde niet-chemische onkruidbestrijdingstechnieken alleen de bovengrondse delen beschadigen moet de bestrijding twee tot vijf maal per jaar worden herhaald, afhankelijk van de effectiviteit en de onkruidsituatie ter plekke. Daarom is het verlagen van de kostprijs per behandeling en het verhogen van de effectiviteit van groot belang voor het terugdringen van het herbicidegebruik op verhardingen.

Bij branden heeft de capaciteit van de machine een veel grotere invloed op de kostprijs dan de brandstofkosten (Klooster, 1983; Hoksbergen & Jager, 1985; Hege, 1989). Hoewel brandstofverbruik uit kostenoogpunt van ondergeschikt belang is, kan een efficiëntere energieoverdracht op planten een hogere werksnelheid en een compactere, beter wendbare machine mogelijk maken en de maatschappelijke acceptatie (vermindering CO<sub>2</sub> uitstoot) helpen vergroten.

## 1.2 Onderzoek ter verbetering van thermische onkruidbestrijdingstechnieken

Bij een thermische onkruidbestrijding worden planten verhit, waardoor stoffen zeer snel uitzetten of verdampen (celmembranen scheuren), of waardoor eiwitten denatureren. Voor de ontwikkeling van efficiëntere machines voor thermische onkruidbestrijding is inzicht nodig in de effectiviteit van warmteoverdrachtsprincipes die op machines kunnen worden toegepast:

- Convection: Via vloeibare, dampvormige of gasvormige media (hete lucht, stoom, heet water of schuim). De grensvlakverschijnselen en de sterk uiteenlopende stromingseigenschappen, temperatuurbereiken en warmtecapaciteiten van de media spelen in dit proces een belangrijke rol.
- Contact: Warmtegeleiding door contact tussen plant en een vast voorwerp.
- Straling: Energieoverdracht door elektromagnetische straling van zeer uiteenlopende golflengte (ultraviolette straling, zichtbaar licht, infrarode straling of magnetronstraling). Het deel van die straling dat door planten wordt geabsorbeerd en omgezet wordt in warmte, is afhankelijk van de golflengte van de straling en het absorptiespectrum van het plantmateriaal.

In de zoektocht naar efficiëntere methoden voor energieoverdracht heeft convection via hete verbrandingsgassen van gasgestookte onkruidbranders vooralsnog de meeste aandacht gehad (Ascard, 1995; Bertram, 1996). Door fundamenteel onderzoek vonden o.a. Bertram (1996) en Storeheier (1996) dat convectieve warmteoverdracht efficiënter wordt door de waterdampdruk van de hete lucht te verhogen (stoom). De aandacht voor infrarode straling is tot nu toe beperkt, omdat infrarood-onkruidstralers even efficiënt (Ascard, 1998) of minder efficiënt (Klooster, 1983; Castille & Ghesquière, 1984; Geier, 1987; Nyström & Svensson, 1998; Hege, 1989, Ascard, 1995) leken te zijn dan stootbranders. Echter, de meeste van deze experimenten met branders laten geen nauwkeurige en eerlijke vergelijking van gasverbruik en rijnsnelheid toe. Een verkennende studie naar onkruidbestrijding met infrarode straling op verhardingen (Kurstjens, 1999) bracht naar voren dat focusering van infrarode straling en een betere benutting van infrarode straling in onkruidbranders nader onderzoek verdienen. De bijdrage van warmtegeleiding is (voor zover bekend) nog niet bestudeerd, maar lijkt van geringe betekenis.

In onkruidbranders spelen alle bovengenoemde warmteoverdrachtsprincipes een rol, maar hun relatieve bijdrage en de efficiëntie daarvan is niet door veldproeven met machines te achterhalen.

Goed opgezette veldstudies zijn geschikt om prestaties van verschillende onkruidbranders te vergelijken. Echter, voor het gericht ontwerpen van betere machines zijn kwantitatieve gegevens over de effectiviteit van de afzonderlijke energieoverdrachtsprincipes nodig.

De schaarse bestaande gegevens over de dodelijke dosis infrarode stralingsenergie bleken sterk uiteen te lopen. Een deel van deze variatie is toe te schrijven aan de opzet van de experimenten (mogelijke invloed van hete lucht), ontbrekende of onnauwkeurige gegevens over de werkelijke stralingsintensiteit bij de plant, en het emissiespectrum van de straler. Simulaties op basis van absorptiespectra uit de literatuur (Kurstjens, 1999) lieten zien dat de golflengte van de straling (c.q. stralertemperatuur) en de afstand van plant tot de straler een grote invloed hebben op de overdrachtsefficiëntie.

### 1.3 Doel

In dit rapport wordt een kasexperiment beschreven waarbij de effectiviteit van controleerbare en gevarieerde doses IR straling werd onderzocht zonder invloed van warmteoverdracht via convectie of door contact. Het experiment heeft drie doelstellingen:

- 1 Het bepalen van de energiedosis-bestrijdingseffect relatie bij warmteoverdracht via infrarode straling bij gele mosterd (*Sinapis alba* L.) bij verschillende meetmethoden om het bestrijdingseffect te kwantificeren
- 2 Het verkennen van de energiebesparing die haalbaar is door focussering van de straling op de stengel van de plant in plaats van op de hele plant.
- 3 Het verkennen van de efficiëntie van energie-overdracht door louter IR straling in vergelijking met energieoverdracht door een combinatie van straling en convectie, zoals bij de huidige onkruidbranders.

Hiermee beoogt dit onderzoek bij te dragen aan de verbetering van de efficiëntie van onkruidbranders.

## 2 Materialen & Methoden

### 2.1 Planten

Om een vergelijking te kunnen maken met andere proeven, was het de bedoeling om gele mosterd (*Sinapis alba* L. "Torpedo") in het 2-4 blad stadium te bestralen. Omdat in een voorafgaande test was gebleken dat in perspotten gezaaide mosterdplanten in dit stadium gemakkelijk omvallen, werd de bestraling uitgevoerd in het kiemblad- tot vroeg 2-blad stadium (figuur 2.1). De gemiddelde stengeldikte was 1.2 mm.

Op 15 en 17 november 1999 werden twee groepen van 25 bakken met elk 140 vochtige perspotjes (4x4x4 cm) van potgrond ingezaaid, bestrooid met een dunne laag rivierzand en uitgezet in een kas. Tot 19 november is de kastemperatuur op 15 °C ingesteld om kieming te bevorderen. Daarna is de kastemperatuur verlaagd tot 10 °C, om te voorkomen dat planten bij deze lage lichtintensiteit te hoog en te slap zouden worden. Het vochtgehalte van de potjes werd op peil gehouden door periodieke begieting. De bestraling werd uitgevoerd op 8, 9 en 10 december (ca. 23 dagen na zaai).



Figuur 2.1 Gele mosterd in het stadium van behandeling

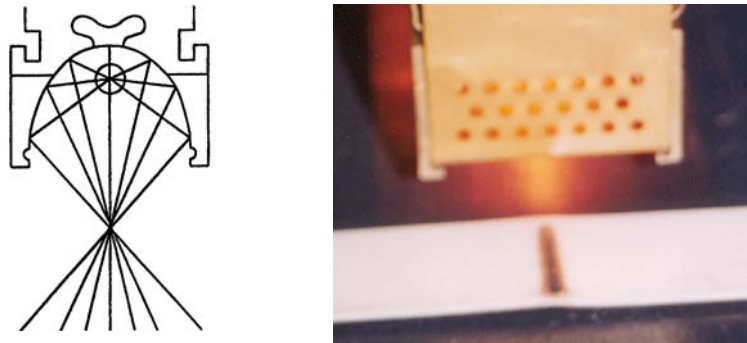
### 2.2 IR-straler

Er is een elektrische infraroodstraler van 2 kW met een elliptische gouden reflector gebruikt, samengebouwd in een cassette met geforceerde luchtkoeling (IRT Infrarodteknik AB, Vänersborg, Zweden, type LE500-2kW). De reflector bundelt de geproduceerde infrarode straling op een brandlijn die 16 mm beneden de onderkant van de cassette ligt (figuur 2.2).

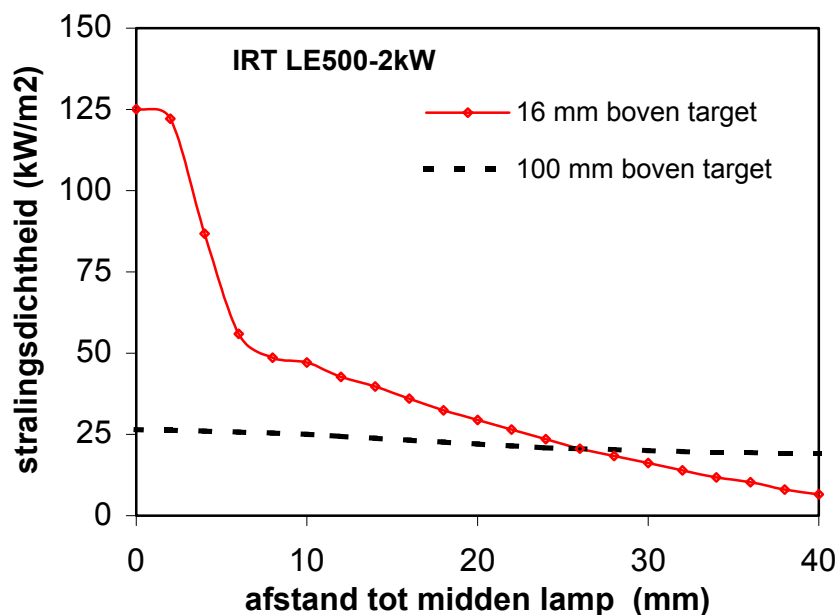
De mate van focussing, en daarmee de stralingsdichtheid ( $\text{kW/m}^2$ ) op het niveau van de plant kan worden gevarieerd door de afstand tot het te bestralen oppervlak (figuur 2.3). De hoeveelheid afgegeven stralingsenergie (stralingsdosis,  $\text{kJ/m}^2$ ) werd ingesteld door de bestralingstijd te variëren.

De IRT catalogus vermeldt alleen een piek-golflengte van  $1.2\mu\text{m}$  en niet de stralertemperatuur van de IRT LE500-2kW bij maximaal vermogen. De genoemde piek-golflengte komt overeen met een stralertemperatuur van ca. 2400 K. Bij die stralertemperatuur absorberen planten 47-63% van de opgevangen straling (gebaseerd op de absorptiespectra van maïs sla, tarwe, ui en papegaaiekruid uit Wolfe & Zissis (1985).





Figuur 2.2 Schematisch effect van de elliptische reflector (links) en demonstratie van de brandlijn op een flexibel plastic veldlabel (rechts).



Figuur 2.3 De stralingsdichtheid onder het midden van de lamp in relatie tot de afstand tot het midden van de lamp (loodrecht op de bewegingsrichting). Berekeningen gebaseerd op prospectus-gegevens van de IRT LE360-1kW cassette.

### 2.3 Proefopzet

Het experiment is uitgevoerd bij twee stralerconfiguraties, "V" en "H". Bij configuratie "V" werd de straler ingesteld op 10 cm boven het blad van de rechtop staande gele mosterd planten. Hierdoor ontstond er op het blad-niveau een strook met een nagenoeg homogene stralingsdichtheid van 25 kW/m<sup>2</sup> (figuur 2.3, 2.4 en 2.5). Bij configuratie "H" werden planten horizontaal gelegd, en werd de brandlijn van de straler ingesteld op het niveau van de platliggende stengels. In deze situatie was de stralingsintensiteit in het midden van de brandlijn 125 kW/m<sup>2</sup>.

Bij elk van de twee stralerconfiguraties werden planten blootgesteld aan een reeks energiedoses, (inclusief een nul-dosis: onbehandeld), door de verplaatsingssnelheid van de straler te variëren (tabel 2.1).



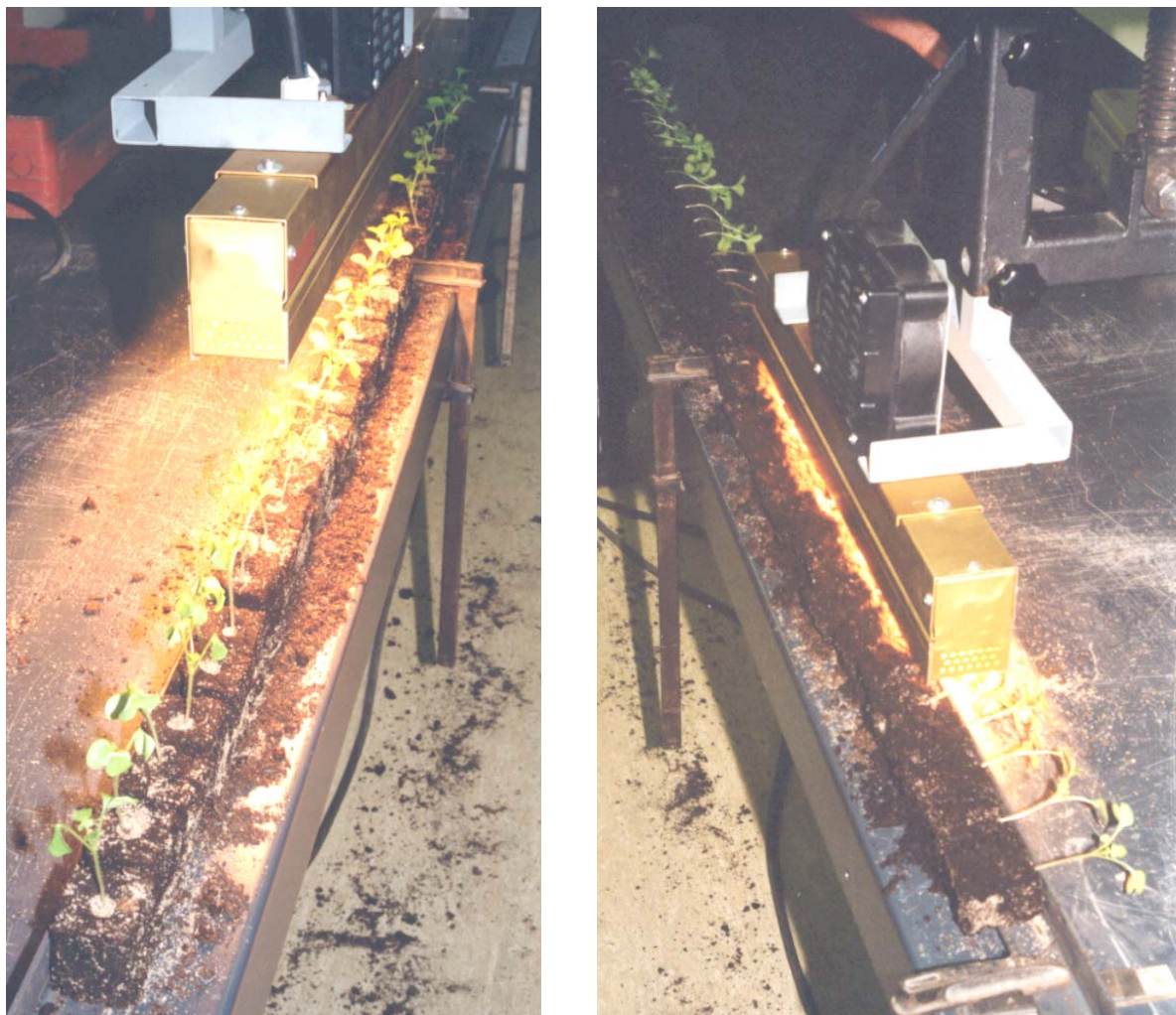
Tabel 2.1 Werkelijke gemiddelde snelheden van de IR straler en de bijbehorende energiedoses op bladniveau (configuratie "V") of op stengelniveau (configuratie "H").

<b>configuratie "V"</b>	<b>e3</b>	<b>e4</b>	<b>e5</b>	<b>e5.5</b>	<b>e6</b>	<b>e7</b>	<b>e8</b>	<b>e9</b>
energiedosis (kJ/m <sup>2</sup> )	116	180	267	328	408	656	992	2110
stralersnelheid (cm/s)	8.91	5.73	3.86	3.15	2.53	1.57	1.04	0.49

<b>configuratie "H"</b>	<b>e3</b>	<b>e4</b>	<b>e4.5</b>	<b>e5</b>	<b>e6</b>	<b>e7</b>
energiedosis (kJ/m <sup>2</sup> )	164	186	216	300	421	528
stralersnelheid (cm/s)	31.06	27.47	23.76	17.03	12.36	10.71

Voor elke stralerconfiguratie werden 7 series blootstellingen aan de verschillende energiedoses uitgevoerd. Omdat gestreefd werd naar zoveel mogelijk waarnemingen rond de verwachte dodelijke energiedosis, zijn bij een aantal series niet alle energiedoses toegediend. Per blootstelling aan een energiedosis werden 30-40 planten gebruikt (tabel 2.2). Binnen een serie werden steeds planten uit een groep met gelijke zaaidatum gebruikt. Om eventuele effecten van plantgrootte te verminderen werden de grootste en kleinste planten via visuele beoordeling verwijderd.



Figuur 2.4 De infraroodstraler (IRT LE500-2KW) in configuratie "V" (links) en "H" (rechts).

Tabel 2.2 Gegevens per groep planten bij beide configuraties. Gewichten in mg per plant.

groep	H1	H3	V1	V3
versgewicht bij bestraling	192	204	188	204
onbestraald versgewicht na 13 dagen	419	429	391	478
versgewicht bij hoogste energieniveau na 13 dagen	106	212	52	34
drooggewicht bij bestraling	10.3	11.6	9.6	11.6
onbestraald drooggewicht na 13 dagen	26.9	26.9	25.4	29.4
aantal series	2	5	3	4
totaal aantal blootstellingen	12	24	13	31
totaal aantal planten	411	945	393	950



Figuur 2.5 De proefopstelling in configuratie "V".

## 2.4 Werkwijze

De straler werd aan de rijdende bok van een werktuigbaan in het laboratorium gemonteerd. De bok werd met een constante snelheid voortbewogen door een traploos variabele aandrijving (figuur 2.5). De hoogte, zijwaartse positie en de hoek van de straler t.o.v. de bewegingsrichting waren instelbaar. Op de werktafel onder de werktuigbaan werd een 3 meter lang hoekprofiel gemonteerd, waarop de te bestralen planten werden geplaatst. De straler en het hoekprofiel werden nauwkeurig uitgelijnd, om een nauwkeurige en constante positie van de brandlijn te krijgen.

Omdat de brandlijn slechts 16 mm onder de onderkant van de straler lag, is bij de bestralingen met configuratie "H" een grondlaag van 1 cm van de zijkant van de perspotjes gesneden (ook van de onbehandelde planten), zodat de behuizing van de straler de planten niet raakte.

Bij elke bestraling werd de werkelijke snelheid van de straler bepaald m.b.v. een stopwatch. Omdat de straler tussen twee bestralingen in werd uitgeschakeld, bleef de koelluchttemperatuur beperkt tot ca 35°C, zodat de convectieve energieoverdracht verwaarloosbaar klein was.

Na de bestraling werden de planten in bakken teruggezet in de kas. De bakken met perspotten werden één maal bevochtigd door ze in een bak met water te zetten. De bakken werden op kleinere kratten gezet om eventuele vraat door muizen te voorkomen. Aantastingen door schimmels of insecten zijn niet waargenomen.

## 2.5 Effectbepaling

Het bestrijdingseffect van de energiedoses werd visueel beoordeeld en volgens vier methoden gemeten op de 13e dag na de bestraling. Eerst werd het effect visueel beoordeeld en beschreven. Bij energiedoses in series met configuratie "H" werd hiertoe ook de lengte van het ingesnoerde, verdroorde deel van de stengel gemeten. Vervolgens werd het aantal "dode" planten geteld om de beschadiging te kwantificeren door middel van het percentage dode planten. Omdat het moeilijk bleek om te beoordelen of planten wel of niet zouden doodgaan, is een mild en een streng dodingscriterium gehanteerd (tabel 2.3).

Tabel 2.3 De criteria voor het als "dood" beoordelen van een plant, bij beide configuraties.

	<b>mild criterium</b>	<b>streng criterium</b>
configuratie "H"	stengel ingesnoerd	stengel ingesnoerd+stervend blad
configuratie "V"	> 95% blad dood	groeipunt dood

Tenslotte werden de planten afgeknipt op ca 2 mm boven het niveau van de potjes en werden het versgewicht en het drooggewicht van de bovengrondse delen bepaald. Met de onderstaande formules werden de versgewichtschade en de groeireductie op basis van droge stof berekend:

### Versgewichtschade (VS in %)

Karakterisering van de schade door VS is een methode die veel in de literatuur wordt aangetroffen. VS wordt berekend als:

$$VS = 100 * \{1 - ((C - M) / (C - D))\}$$

waarin: C = versgewicht van onbestraalde planten na 13 dagen

M = versgewicht van bestraalde planten na 13 dagen

D = versgewicht van met de hoogste energiedosis bestraalde planten na 13 dagen

Het bestralingseffect wordt bij deze methode uitgedrukt op een schaal van 0% (onbehandelde planten) tot 100% (geheel gedode planten bij de hoogste energiedosis).

### Groeireductie (GR in %)

GR werd berekend op basis van de drogestoftoename van de planten na de bestraling:

$$GR = 100 * \{1 - ((C_t - M_t) / (C_t - C_0))\}$$

waarin: C<sub>t</sub> = drooggewicht van onbestraalde planten na 13 dagen

C<sub>0</sub> = drooggewicht van de planten op het tijdstip van bestralen van de planten

M<sub>t</sub> = drooggewicht van bestraalde planten na 13 dagen

Het bestralingseffect wordt bij deze methode uitgedrukt op een schaal van 0% (onbehandelde planten) tot 100% (planten die na de bestraling in het geheel niet meer gegroeid zijn).

Voor de verschillende parameters is de Effectieve Dosis energie (in kJ/m<sup>2</sup>) bij 50% (ED50) effect bepaald door het volgende logistische regressiemodel te fitten.

$$effect = \frac{100\%}{1 + \left(\frac{ED50}{dosis}\right)^B} \quad (in \%)$$

Zulke modellen worden ook gebruikt in herbicidenonderzoek (Streibig & Kudsk, 1993) en onderzoek naar onkruidbranders (Ascard, 1995). Hierin staat B voor de steilheid van de curve. De effecten op het versgewicht en drooggewicht zijn geanalyseerd met behulp van de Genstat 5 directive FITNONLINEAR, waarbij het aantal planten per behandeling als weegfactor is gebruikt. De tellingen (%dood streng en % dood mild) zijn geanalyseerd op logit-schaal met een binomiale verdeling m.b.v. de directive IRREML.



### 3 Resultaten en discussie

In de periode tussen de bestraling en de effectbepaling waren de lichtintensiteit, de temperatuur en de potentiële verdamping laag. Hierdoor zijn onbehandelde planten minder snel gegroeid en ondervonden beschadigde planten minder stress dan onder normale zomerse omstandigheden op bestralingen of in het open veld het geval geweest zou zijn. Naar verwachting hebben deze omstandigheden vooral invloed gehad op het effect bij configuratie "H". Tijdens het bestralen bogen de stengels op het door de brandlijn verhitte punt (figuur 3.1). Bij de effectbepaling was het bestraalde deel van de stengel ingesnoerd en verdord, terwijl het blad was nog intact was (figuur 3.2). Stervend blad werd alleen waargenomen bij zeer hoge energieniveaus.



Figuur 3.1 Het directe effect van het bestralen van gele mosterd stengels in configuratie "H"



Figuur 3.2 Het effect van bestraling in configuratie "H" met energieniveau e6 na 13 dagen.

Tijdens het passeren van de straler in configuratie "V" verwelkte het blad, maar directe beschadiging van het groeipunt was niet goed waarneembaar. Het grote kiemblad werd bij lagere energieniveaus meer beschadigd dan het kleine eerste echte bladpaar (figuur 3.3). Tabel 3.1 geeft de bestrijdingseffecten kwalitatief weer. De dosis-effect curven van IR bestraling bij verschillende meetmethoden zijn weergegeven in figuur 3.4.



Figuur 3.3 Effect van verschillende stralingsdoses in configuratie "V" na 13 dagen.

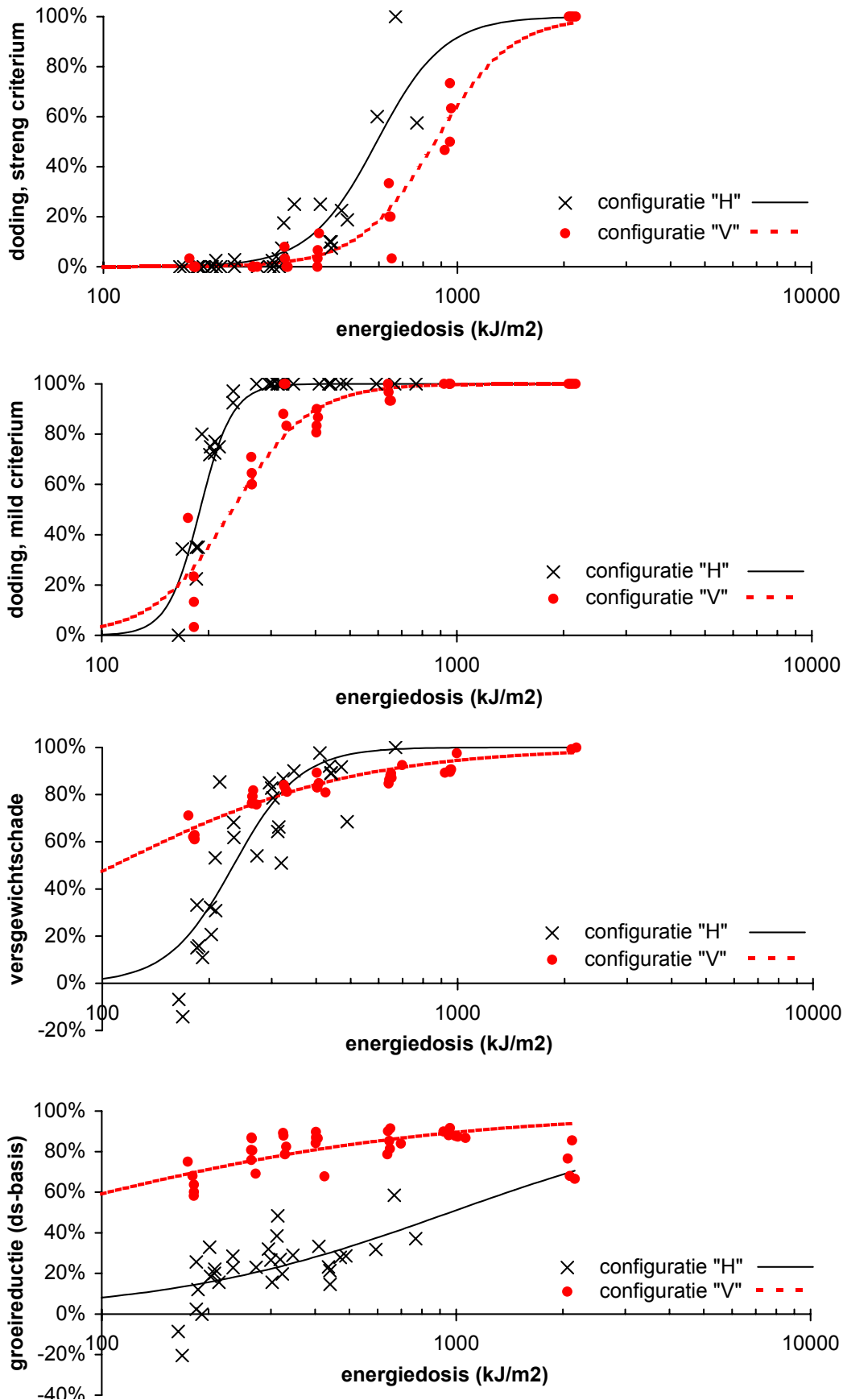
Tabel 3.1 Kwalitatieve effecten 13 dagen na behandeling, per energieniveau en configuratie.

<b>energiedosis (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>effect stralerconfiguratie "H"</b>
164	onbeschadigd
186	stengel 0-2 mm ingesnoerd
216	stengel 2-5 mm ingesnoerd
300	5-10 mm ingesnoerd, echt blad soms klein en donker
421	10-15 mm ingesnoerd, echt blad soms klein en donker
528	10-15 mm ingesnoerd, blad soms verwelkt

<b>energiedosis (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>effect stralerconfiguratie "V"</b>
116	onbeschadigd
180	helft kiemblad beschadigd
267	kiemblad verwelkt, topje echt blad beschadigd
328	kiemblad verwelkt, echt blad half beschadigd
408	klein stukje echt blad groen
656	blad nagenoeg verwelkt, groeipunt intact
992	blad, groeipunt en deel stengel verwelkt
2110	blad, groeipunt en deel stengel verwelkt





Figuur 3.4 Dosis-effect curven voor de vier dodingsparameters. De lage groei-reductie bij de hoogste energiesdosis in configuratie "V" is veroorzaakt doordat deze planten plat op de grond lagen. De aan de plant gekleefde gronddeeltjes konden slechts gedeeltelijk worden verwijderd.



Tabel 3.3 Regressieparameters van de dosis-effect modellen, met tussen haakjes hun standaardafwijking. De standaardafwijkingen van de ED50 van %dood streng en % dood mild ontbreken omdat de analyse is uitgevoerd op logit-schaal.

dodingsparameter	ED50		B	
	H	V	H	V
gedode planten (% , streng)	592	863	4.57 (0.33)	4.04 (0.29)
gedode planten (% , mild)	189	233	9.46 (0.70)	3.96 (0.33)
versgewichtschade (%)	234 ( 6)	109 (29)	4.65 (0.55)	1.28 (0.33)
groeireductie (% , ds-basis)	960 (223)	62 (20)	1.07 (0.24)	0.77 (0.14)

De resultaten die uit de voorgaande tabellen en grafieken naar voren komen worden hieronder besproken aan de hand van de in de inleiding genoemde doelstellingen.

1. De waarde van de ED50 is uiteraard sterk afhankelijk van de parameter waarmee het bestrijdingseffect wordt gekwantificeerd (Tabel 3.3). De ED50 voor het percentage dode planten volgens het strenge criterium is logischerwijs hoger dan de ED50 voor het percentage dode planten bij het milde criterium, maar ook hoger dan de ED50 voor versgewichtschade en groeireductie. Dit kan verklaard worden uit het feit de niet gedode planten toch schade hebben ondervonden. Dit effect is ook gerapporteerd door Ascard (1995; 1998), die het aantal dode planten en de versgewichtschade na 6, 7 of 14 dagen als parameters hanteerde.

Dit effect wordt ook geïllustreerd door de beoordelingen en metingen bij configuratie V. Bij een energiedosis van ongeveer 300 kJ/m<sup>2</sup> verwelkten de kiembladen zodanig dat deze afstierven. Bij deze energiedosis begint de dosis-effectcurve voor het percentage dode planten volgens het strenge criterium te stijgen en bereikt de versgewichtschade een niveau van 80% en de groeireductie een niveau van 75%.

Of een plantje (visueel) na de bestraling doodgaat, schade gaat vertonen, verdort en/of minder groei vertoont dan onbehandelde planten zal mede afhangen van de lengte van de wachttijd en de omstandigheden: onder sterk drogende, lichte omstandigheden zullen meer planten doodgaan dan onder vochtige, donkere omstandigheden. De omstandigheden tijdens de wachttijd hebben ook invloed op de groei van de onbehandelde planten. Onder de omstandigheden in dit experiment waren zowel de groei van onbehandelde planten, de verdorring en de reductie in groei beperkt. Dit heeft, met name voor de parameter groeireductie voor configuratie H geleid tot relatief grote meetfouten en kleine effecten, waardoor de ED50 onverwacht hoog was.

Voor vergelijking van het effect van bestrijdingsmethoden op korte termijn zijn de vier parameters in principe allen bruikbaar. Een nadeel van de het visueel beoordeelde percentage dode planten is dat het resultaat sterk afhangt van de persoon die de planten beoordeelt. De parameter versgewichtschade heeft als voordeel ten opzichte van de parameter groeireductie dat optredende verdorring van plantenweefsel meegewogen wordt. Bij de versgewichtschade moet het referentieniveau voor 100% schade (de schade bij de meest agressieve dosis) goed worden gedefinieerd. Voor vergelijking van het effect van bestrijdingsmethoden op langere termijn, inclusief hergroei-effecten, is de parameter groeireductie het meest geschikt. In dit geval hebben de tellingen als nadeel dat geen indicatie gegeven wordt van de groei van de resterende planten.

Voor vergelijking van energiedosis-bestrijdingseffect relaties met gevonden relaties in andere, soortgelijke proeven is het vooral van belang dat de gebruikte apparatuur goed beschreven wordt, de gehanteerde parameters goed gedefinieerd zijn en dat de omstandigheden waaronder de experimenten uitgevoerd zijn zo goed mogelijk overeenkomen. Ter illustratie: Parish (1989) vond bij kiemplanten van gele mosterd een dodelijke stralingsenergiedosis van 200 kJ/m<sup>2</sup> bij bestraling met een buisvormige kwartslamp met een stralingsintensiteit van 33,3 kW/m<sup>2</sup> (piekgolflengte 2.6 µm, 950°C). Het is echter niet duidelijk op welke effectparameter dit getal betrekking heeft, en of de stralingintensiteit is gemeten ter hoogte van de planten. Doordat Parish een lagere stralertemperatuur gebruikte, kunnen planten een groter deel van de straling absorberen (75-89% ten opzichte van 47-63% bij de IRT straler<sup>1</sup>; Kurstjens, 1999) Ook is niet duidelijk of convectieve

<sup>1</sup> Gebaseerd op een stralertemperatuur van resp. 1200 K en 2400 K en de absorptiespectra van maïs sla, tarwe, ui en papegaaiekruid uit Wolfe & Zissis (1985).

warmteoverdracht een rol speelde. Een directe vergelijking van de resultaten is daarom niet mogelijk.

2. Bij de vergelijking van het bestrijdingseffect van de twee stralerconfiguraties deed zich het verschijnsel voor dat de ED50's voor de op tellingen gebaseerde parameters bij configuratie H lager waren dan de ED50's bij configuratie V ( $P < 0.001$ ), terwijl bij de beoordeling gebaseerd op plantgewichten de ED50's juist hoger waren ( $P < 0.001$ ). De oorzaak hiervan is dat bij configuratie H het blad niet beschadigd raakte, door de groeiomstandigheden na bestraling niet snel verwelkte en daardoor nog enige tijd in gewicht toenam. Onduidelijk is in hoeverre door de ingesnoerde stengels nog vocht en voedingsstoffen getransporteerd konden worden. Het percentage dode planten volgens het strenge criterium (planten met ingesnoerde stengel én stervend blad) lijkt daarom de meest betrouwbare parameter.

Indien driedimensionale focussing van de straling mogelijk zou zijn tot op de millimeter, zou de energiedosis niet per oppervlakte-eenheid, maar per plant vergeleken mogen worden. Voor de berekening van de energiedosis per plant werd de energiedosis in  $\text{kJ/m}^2$  vermenigvuldigd met het effectief bestraalde oppervlak per plant. Bij configuratie V was dit ongeveer  $4 \text{ cm}^2$  en bij configuratie H ongeveer  $3,6 \text{ mm}^2$ . De ED50 per plant bij het strenge dodingscriterium is dan respectievelijk 346 Joule voor configuratie V en 2,13 Joule voor configuratie H. In dit geval is de energiewinst door focussing van de straling op een deel van de stelling dus een factor 160.

In een oriënterende proef met dezelfde gele mosterdplanten als in de hier beschreven proef met IR straling was bij blootstelling van de stengel aan  $\text{CO}_2$ -laserstraling een energiedosis van 0,2 Joule per plant voldoende om 86% van de planten te doden. Hierbij werd een 25 W laser gebruikt bij een snelheid van 0,15 m/s. De stengels van de gele mosterdplanten waren 1,2 mm dik. De kerf waaruit het plantmateriaal was "verdamp" was ongeveer 0,5 mm breed. Bij toepassing van gefocusseerde laserstraling lijkt dus een verdere energiebesparing met ongeveer een factor 10 potentieel mogelijk.

3. Om te beoordelen of energieoverdracht door alleen infrarode straling efficiënter is dan door een combinatie van convectie en IR straling zijn de resultaten vergeleken met die van een veldexperiment van Ascard (1998). Bij dit veldexperiment werd gele mosterd in het 4-blad stadium bestreden met een Catter onkruidbrander en een Agrodynamic onkruidstraler. In het experiment werd een ED50 op basis van vergewichtschade bereikt bij respectievelijk een LPG verbruik van 17,2 kg/ha en 19,2 kg/ha. Overigens werd bij eigen onderzoek naar bestrijding van gele mosterd in het 4-blad stadium met een HOAF Weedstar 100 een lager gasverbruik gemeten bij 50% vergewichtschade (Kurstjens *et al.*, 1999). De ED50 voor alleen infrarode straling (basis vergewichtschade) bij configuratie V was  $109 \text{ kJ/m}^2$ . Dit komt overeen met een gasverbruik van  $21,7 \text{ kJ/m}^2$ .

Hieruit zou men kunnen concluderen dat energieoverdracht door infrarode straling niet efficiënter is dan door convectie. Hierbij dient men zich echter te realiseren dat de volgende factoren een vertekend beeld kunnen opleveren:

- De straling die door gasgestookte branders opgewekt kan worden heeft een langere golflengte dan de IRT straling en zal daarom beter door de planten geabsorbeerd worden (Kurstjens, 1999). Daardoor zou het LPG verbruik bij door gas opgewekte straling mogelijk verminderd kunnen worden tot 15 kg/ha.
- De planten in het experiment met de IRT staler waren kleiner dan de planten in de branderexperimenten. In vergelijking met het experiment van Ascard (1998) zou hierdoor het LPG verbruik bij louter straling juist onderschat zijn.
- Er waren grote verschillen in groeiomstandigheden en de periode tussen behandeling en effectbepaling waren niet gelijk.

## 4 Conclusies en aanbevelingen

- De benodigde energiedosis om gele mosterdplanten in het vroege twee-blad stadium te bestrijden met infrarode straling van bovenaf bedraagt  $109 \text{ kJ/m}^2$  (50% versgewichtschade) tot  $300 \text{ kJ/m}^2$  voor doding van bestraalde weefsels (80% versgewichtschade). Bij een geschat bladoppervlak van ca.  $4 \text{ cm}^2$  komt dit overeen met 44 J resp. 120 Joule stralingsenergie per plant. De benodigde hoeveelheid energie per plant werd met een factor 160 verlaagd door alleen de stengel van de plant door te schroeien in de brandlijn van de straler.
- De dosis-effect curve hangt sterk af van de gekozen meetmethode voor het effect van IR straling. Bij bepaling van het aantal gedode planten is de strengheid van het criterium zeer bepalend. Bij bestraling van bovenaf liep de ED50 uiteen van  $62 \text{ kJ/m}^2$  voor 50% groeireductie (op basis van drooggewicht) tot  $233 \text{ kJ/m}^2$  bij een mild dodingscriterium (blad >95% dood) en  $863 \text{ kJ/m}^2$  bij een streng dodingscriterium (groeipunten dood).
- Energieoverdracht met louter infrarode straling van bovenaf is niet efficiënter dan energieoverdracht door onkruidbranders, die een combinatie van straling en hete lucht produceren. Door pleksgewijze of precisiebehandeling middels focusering van straling op gewasstroken, onkruidplekken, individuele planten of plantendelen (bijvoorbeeld het groeipunt of de stengel) is een aanzienlijke energiebesparing per oppervlakte-eenheid mogelijk en waarschijnlijk ook een verhoging van de capaciteit.

## Referenties

- Ascard, J., 1995. *Thermal weed control by flaming: Biological and technical aspects*. Dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Alnarp, Report 200.
- Ascard, J., 1998. Comparison of flaming and infrared radiation techniques for thermal weed control. *Weed Research* 38:1, 69-76.
- Augustin, B., 1990. Biologische Wirkung, Wirtschaftlichkeit, Handhabung und Umwelt verträglichkeit von Infrarotstrahlern zur Unkrautbekämpfung im kommunalen Bereich. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* sonderheft 12, 447-453.
- Bertram, A., 1996. *Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung*. Dissertation. Institut für Landtechnik der Technischen Universität München, Weihenstephan, 195 pp.
- Castille, C.; Ghesquière, P., 1985. Flame weeding trials on seeded onions. *Proceedings of the international meeting of flame cultivation for weed control*, Namen, België, 26-33.
- Geier, B., 1987. Systeme der Abflammtchnik und mögliche Arbeitersparnis. In: Geier, B.; Hoffmann, M. (ed.). *Beikrautregulierung statt Unkrautbekämpfung - Methoden der mechanische und thermische Regulierung*. *Alternative Konzepte* 58, C.F. Müller Verlag Karlsruhe, 143-149.
- Hege, H., 1989. *Thermische Unkrautbekämpfung im Gartenbau*. Institut für Technik im Gartenbau, Weihenstephan, Germany. 33 pp. (Unpublished report).
- Hoksbergen, F.T.J.; Jager, K., 1985. *Mogelijkheden en beperkingen van onkruidbestrijding op verhardingen met stootbranders*. Rijksinstituut voor onderzoek in de bos- en landschapsbouw "De Dorschkamp", Dorschkamrapport 404, 57 pp.
- Klooster, J.J., 1983. Thermische onkruidbestrijding, een interessant alternatief. *Landbouwmechanisatie* 34: 8, 787-789.
- Kurstjens, D.A.G., 1999. *Onkruidbestrijding met infrarode straling op verhardingen*. Deel 1 Verkenning. IMAG-DLO Nota P 99-28, Instituut voor Milieu- en Agritechniek, Wageningen. 45 pp.
- Kurstjens DAG; Sonneveld C; Letter R, 1999. *Onkruidbestrijding met IR straling: Vergelijking van de HOAF Weedstar 100 onkruidbrander en een TENNON 20-200 prototype IR-straler*. Nota V99-112, WUR-IMAG Wageningen, 27 pp.
- Nyström, P.; Svensson, S.E., 1988. *Termisk ogräsbekämpning på hårdgjorda ytor. Försöksverksamhet 1987*. (Thermal weed control on hard surfaces. Experimental work 1987). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 123. Alnarp, Sweden. 52 pp.
- Parish, S., 1989. Weed control - testing effects of infrared radiation. *Agricultural Engineer*, Summer, 53-55.
- Sluijsmans, J.J.L.; Hoksbergen, F.T.J., 1992. *Praktijkonderzoek naar mogelijkheden voor thermische onkruidbestrijding op verhardingen in de gemeente Arnhem*. IBN-DLO Wageningen, Dorschkamrapport 674, 38 pp.
- Spijker, J.H.; Niemeijer, C.M.; Boer, T.W. de, 1998. *Onkruid op verhardingen. Deel 3 van Groenwerk, Praktijkboek voor bos, natuur en stedelijk groen*. Elsevier Bedrijfsinformatie, IBN-DLO, IKC Natuurbeheer en IPC Groene Ruimte. Doetinchem.
- Storeheier, K., 1996. *Damp som energibaerer ved termisk ugrasbekjempelse*. Institutt for Tekniske Fag, Ås, Norway. ITF Rapport 80/96. 15 pp.
- Streibig J.C.; Kudsk P., 1993. *Herbicide bioassays*. CRC press Boca Raton, 270 pp.
- Wolfe, W.L.; Zissis, G.J., 1985. *The infrared handbook*. Revised edition. Environmental Research Institute of Michigan.

## Summary

Thermal weed control methods usually damage only the visible plant parts. Killing is often not complete and repeated passes are needed to achieve an effect in time, comparable to a single chemical treatment. The higher cost of thermal control impedes a more widespread application. Therefore, it is desirable to develop more efficient equipment with increased effect and capacity. For this purpose, dose-effect relationship of energy transfer by infrared (IR) radiation was investigated. The observed energy efficiency was also compared with the energy efficiency reported for field experiments with flaming equipment.

The laboratory experiment described in this report quantifies dose-effect relationships for the exposure of white mustard (*Sinapis alba* L.) to IR radiation. The plants were grown in a glasshouse and exposed to IR radiation in the early two-leaf stage, when the leaf area was about 4 cm<sup>2</sup> per plant, and the diameter of the pseudostems was 1.2 mm. An electric IR radiator with an elliptical reflector (IRT LE500-2kW) was used, having a peak energy density of 125 kW/m<sup>2</sup> at the radiator's focus line. Two plant exposure strategies were used: exposure of the whole plant from above to an energy density of 25 kW/m<sup>2</sup>, and exposure of the pseudostems of the plant to the radiator's focus line. The effects were assessed after 13 days after exposure, using four characteristics: 1) the percentage of plants having a killed growth point, 2) the percentage of plants with almost all (95%) leaf tissue killed, 3) fresh weight damage, and 4) growth reduction based on plant dry weight.

Plants exposed to an IR radiation energy dose of 300 kJ/m<sup>2</sup> (120 J per plant) from above yielded but a few percent killed growth points, but the leaves of about 65% of the plants were dead and the fresh weight damage was 80%. The energy dose required for 50% fresh weight damage was 109 kJ/m<sup>2</sup>. Killing the growth point of half the plant population required exposure to a dose of 863 kJ/m<sup>2</sup> (346 J per plant). At that dose, all leaf tissue exposed to radiation was killed and growth reduction was about 90%. Complete killing of all plants and 100% growth reduction was achieved at a dose of about 1200 kJ/m<sup>2</sup> (480 J per plant).

Exposure of the stems to the radiator's focus line at a radiation energy dose of 300 kJ/m<sup>2</sup> (1 J per plant) singed a 3-mm wide strip across the stem. Though all plants were bound to die under normal growing conditions, the leaf tissue remained green during the 13 days in between treatment and assessment, due to cool and damp conditions in the greenhouse during wintertime. Therefore, the measured damage was less pronounced when assessed by the quantitative parameters.

Field experiments with covered flammings and gas-powered radiators feature a combined heat transfer by convection and radiation, whereas in this experiment there was no heat transfer by convection. When comparing the required energy for whole field treatment that would yield 50% fresh weight damage of white mustard, the use of pure IR radiation appeared to be less efficient than the flaming treatments reported in field studies. However, compared to heat transfer by convection, radiation may be easier to focus on crop strips, weed patches, individual plants or specific parts of plants. Therefore site-specific or precision heating by focussed IR radiation might offer potential to improve the energy efficiency and capacity of thermal weed control equipment.