

Vertrouwelijk rapport

Onkruidbestrijding met IR straling:
Vergelijking van de HOAF Weedstar 100 onkruidbrander en
een TENNON 20-200 prototype IR-straler.

D.A.G. Kurstjens, C. Sonneveld & R. Letter

oktober 1999

Nota V 99 -112



Voorwoord

Dit vergelijkend onderzoek met twee onkruidbranders maakt deel uit van het door ECN geleide project “Onkruidbestrijding middels infrarode straling”. In dat project heeft de opdrachtgever, LBW, met medefinanciering door de provincie Noord Holland, ECN en EcoCeramics een IR straler doen ontwikkelen op basis van de door ECN ontwikkelde schuimbranders. Het door Eco Ceramics en ECN ontwikkelde prototype werd beproefd op de IMAG-proefboerderij “De Oostwaardhoeve” te Slootdorp.

Bij deze willen we graag Gerrit Goedbloed en Peter Goedbloed (Oostwaardhoeve), Wolter Wolthers en Piet Goverse sr. (EcoCeramics), Ep Zuidema (LBW Slootdorp) en Hans Kooter (ECN) bedanken voor de prettige samenwerking.

Ir. D.A.G Kurstjens

Ing. C. Sonneveld

Ing. R. Letter

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	2
1.1 Achtergrond	2
1.2 Doelstelling	3
1.3 Werkwijze	3
2 Beschrijving onkruidbranders	4
2.1 HOAF Weedstar 100	4
2.2 TENNON 20-200	4
2.3 Vermogen, infrarode straling en hete lucht	5
2.4 Geluidsmetingen	7
3 Dosis-respons experiment in gele mosterd	8
3.1 Materiaal en methoden	8
3.2 Resultaten	9
4 Doding van gras	13
4.1 Materiaal en methoden	13
4.2 Resultaten	14
5 Loofdoding van pootaardappelen	18
5.1 Materiaal en methoden	18
5.2 Resultaten	19
6 Discussie	21
6.1 De rol van infrarode straling en hete verbrandingsgassen	21
6.2 Mogelijke verbeteringen	22
6.3 Perspectieven op verhardingen	23
6.4 Perspectieven in de landbouw	23
7 Conclusies	24
Referenties	25
Bijlage A Berekening van de fractie stralingsenergie die in een gewasstrook terecht komt	26

Samenvatting

Effectievere machines met een hogere capaciteit zijn gewenst om de kosten van niet-chemische onkruidbestrijding op verhardingen terug te dringen en een aantrekkelijker alternatief te bieden voor de chemische bestrijding. Op initiatief van TENNON bouwde EcoCeramics een prototype onkruidbestraler met door ECN ontwikkelde schuimbrander, die 44-59% van het vermogen als infrarode straling afgeeft. Dit rapport kwantificeert het specifieke gasverbruik (kg/ha) van dit prototype en een gangbare HOAF Weedstar 100 onkruidbrander bij een vergelijkbare mate van doding van gele mosterd, gras en geklapt aardappelloof. Ook het verschil in werksnelheid en het verschil in de akoestische belasting worden bepaald. Dit onderzoek moet uitwijzen of het verder ontwikkelen van de nieuwe IR-straler perspectief biedt voor onkruidbestrijding op verhardingen.

De HOAF verbruikte 21.8 kg LPG per uur, hetgeen overeenkomt met een vermogen van ruim 300 kW. De branders met een naar achteren gerichte, sterk geforceerde luchttoevoer geven een sterk turbulente luchtstroom die door kan dringen in dichte plantmassa's. De vlammen verhitten tevens de geïsoleerde afdekking, die naar schatting 10% van het totaal vermogen als straling afgeeft. De TENNON met instelbaar vermogen had een lager gasverbruik (10.6 - 11.2 kg/u) en een lager maximumvermogen (148 - 156 kW), maar hiervan wordt naar schatting 44% (69 kW) als straling afgegeven.

De ECN brander is op 7.5 meter afstand naast de machine nauwelijks hoorbaar, terwijl de HOAF duidelijk meer geluid maakt (65 dBa bij 39 dBa omgevingsgeluid). Op een betonvloer voor een schuur produceerden de HOAF en Iseki 530 trekker samen 75.7 dBa, hetgeen binnen normale grenzen ligt. In de cabine van de Iseki 530 trekker overstemt het motorgeluid (77.2 dBa) het geluid van de HOAF brander (76.1 dBa).

Uit de onderstaande tabel blijkt dat de HOAF bij een vergelijkbaar bestrijdingsresultaat in alle situaties minder gas verbruikte en een hogere rijnsnelheid kon halen. Bij gras was het verschil kleiner (TENNON: 25% meer gasverbruik, 40% van de capaciteit van HOAF) dan bij mosterd (TENNON: 2.6 maal zoveel gasverbruik, 19% van de capaciteit van HOAF). De proef in gele mosterd in het 4-blad groeistadium is in vier herhaling uitgevoerd en vormt de meest degelijke basis voor een vergelijking. De andere proeven hebben een oriënterend karakter. Omdat de branders niet zijn afgestemd op het gebruik voor loofdoding in aardappelen zijn de gegeven getallen niet representatief.

	gasverbruik (kg/ha)		rijnsnelheid (km/u)	
	HOAF	TENNON hoog	HOAF	TENNON hoog
80% doding mosterd	32	85	6.5	1.2
doding gras in twee werkgangen	150	190	2.7	1.1
doding geklapt aardappelloof ^{a)}	280	450	0.8	0.2

a) mate van doding: 1 nieuw uitgelopen stengel per 4 meter rug

Het huidige prototype zou op verscheidene punten kunnen worden verbeterd (veiligheid, geïsoleerde gastoevoerleidingen, kwetsbaarheid stralers), met als belangrijkste punt een betere afvoer van waterdamp die vrijkomt uit planten en bij de verbranding. Waterdamp tussen straler en onkruid absorbeert een deel van de IR straling, maar we weten niet hoe groot de effecten van waterdamp en luchtsnelheid zijn. De uitreesnelheid van de verbrandingslucht uit de stralers is waarschijnlijk te laag om goed door te dringen in dichte plantmassa's en de ontstane waterdamp af te voeren. Daarom lijkt het onwaarschijnlijk dat de efficiëntie van een machine met alléén horizontale stralende elementen de efficiëntie van stootbranders met geforceerde luchttoevoer (zoals HOAF) kan overtreffen.

Mogelijk ligt de winst van stralende elementen in een combinatie met een geforceerde stootbrander in een compacte, bestuurbare unit met een regelbaar hoog vermogen voor onkruidbestrijding op verhardingen. De hittebestendigheid van de constructie verdient hierbij veel aandacht en vormt een mogelijk knelpunt. In de landbouw zijn er toepassingsmogelijkheden bij de loofdoding in aardappelen en onkruidbestrijding voor gewasopkomst in de biologische teelt. Bij verticaal of schuin geplaatste schuimbranders ontstaat tevens een natuurlijke afvoer van de waterdamp.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De afhankelijkheid van herbiciden in de praktijk van de onkruidbeheersing bedreigt het milieu. In het Openbaar Groen maken herbiciden meer dan 98% uit van het totale pesticidegebruik. Regelmatig worden, o.a. in het oppervlaktewater, stoffen in het milieu aangetroffen waarvan aangenomen wordt dat deze toegepast zijn bij de bestrijding van onkruid. Terugdringing van het gebruik van herbiciden is milieutechnisch, maar ook vanwege de publieke opinie, zeer gewenst. Effectieve en efficiënte machines kunnen helpen dit doel te bereiken.

Momenteel zijn borstelmachines en branders de meest gebruikte alternatieven voor chemische onkruidbestrijding op parkeerplaatsen, trottoirs, bedrijfsterreinen en andere (half) verhardingen. Een grootschalige omschakeling op deze alternatieven wordt vooral belemmerd door de hogere kostprijs per m². Een borstelbehandeling is duurder (f 0,27 – f 0,35 per m², Sluijsmans en Hoksbergen, 1992) dan een werkgang met een brander (f 0,05 – f 0,10 per m², Hoksbergen en Jager, 1985; Augustin, 1990), maar is effectiever in zwaar begroeide situaties met grond op de verharding (Sluijsmans en Hoksbergen 1992). Omdat zowel branden als borstelen 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.

Bij branden heeft de capaciteit van de machine een veel grotere invloed op de kostprijs dan de brandstofkosten (Klooster, 1983; Hoksbergen en Jager, 1985; Hege, 1989). Daarom kan de kostprijs per m² worden verlaagd door een betere manoeuvreerbaarheid van de machine (obstakels) en door verhoging van de rijsnelheid (bij gelijkblijvende effectiviteit). Hoewel het brandstofverbruik uit kosten oogpunt van ondergeschikt belang is, kan een efficiëntere energieoverdracht op planten een hogere werksnelheid en een compactere machine mogelijk maken en de maatschappelijke acceptatie (CO₂ uitstoot) helpen vergroten. Bij verbetering van onkruidbranders zijn de volgende kernmerken van belang:

- compactheid en laag gewicht
- hoge energie-efficiëntie
- hoog vermogen per m² machineoppervlak
- regelbaarheid van het vermogen
- laag geluidsniveau
- scherpe afscherming van hete lucht en machinedelen van de omgeving in verband met brandgevaar, hinder voorbijgangers en bestrijding tot aan de grens tussen verharding en tuinen, gras of struikgewas.

Gangbare onkruidbranders voor gebruik op verhardingen (zie Medema, 1997 voor een overzicht) werken meestal met een naar achteren gerichte open vlam onder een geïsoleerde afdekking, met een open of geforceerde toevoer van verbrandingslucht. Hoewel sommige fabrikanten claimen dat hun afdekking onkruiden (mede) doodt door middel van infrarode straling, zijn er nog geen betrouwbare gegevens over de relatieve bijdrage van straling en hete lucht in het dodingseffect bekend. Beide principes van energieoverdracht hebben voor- en nadelen, die in de discussie (hoofdstuk 6) aan de orde komen. In fundamenteel onderzoek heeft convectieve warmteoverdracht door hete verbrandingsgassen vooralsnog de meeste aandacht (Ascard, 1995; Bertram, 1996), omdat infraroodstralers 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. Hoewel in het verleden verschillende experimenten zijn gedaan met diverse branders, laten de meeste resultaten geen eerlijke vergelijking toe. Het vergelijken van gasverbruik en rijsnelheid is pas mogelijk bij een vergelijkbaar bestrijdingseffect.

ECN heeft een gasbrander ontwikkeld die op een efficiënte wijze een groot stralingsvermogen levert. Deze zgn. schuimbrander wordt door Eco Ceramics op de markt gebracht voor diverse toepassingen. Op initiatief van de TENNON groep is in een project met ECN en Eco Ceramics een prototype onkruidstraler ontwikkeld voor toepassing op verhardingen. Het in dit rapport beschreven door IMAG uitgevoerde onderdeel van dit project betreft een studie naar de geluidsproductie en de haalbare efficiëntie en capaciteit van dit prototype (TENNON 20-200), in vergelijking met een bestaande brander (HOAF Weedstar 100).

1.2 Doelstelling

De doelstelling van het deelproject is het kwantificeren van het specifieke gasverbruik (kg/ha) van twee typen branders, dat tot dezelfde mate van doding leidt. Ook het verschil in werksnelheid en het verschil in de akoestische belasting worden bepaald. Hieruit moet kunnen worden afgeleid of het verder ontwikkelen van de nieuwe IR-straler perspectief biedt voor onkruidbestrijding op verhardingen.

1.3 Werkwijze

Op de 'Oostwaardhoeve' in Slootdorp werden experimenten uitgevoerd met een door LBW ter beschikking gestelde HOAF Weedstar 100 onkruidbrander met door de fabrikant optimaal geachte instellingen en met een door Eco Ceramics geleverd prototype van de TENNON 20-200 infrarood-onkruidbestraler met regelbaar vermogen (beschrijving in hoofdstuk 2). Na bepaling van het specifiek gasverbruik (kg per meter werkbreedte per uur) en de geluidsproductie van beide branders werden drie veldexperimenten gedaan:

- Dosis-respons analyse met vier rijksnelheden in vier herhalingen in gele mosterd, met de volgens fabrieksvoorschriften ingestelde HOAF en de TENNON op "hoog" (maximum) en "laag" vermogen. Hoewel gele mosterd (*Sinapis alba* L.) in het 4-blad stadium niet direct representatief is voor een gemengde onkruidpopulatie op verhardingen, is dit experiment herhaalbaar en kunnen de resultaten beter worden vergeleken met ander vergelijkend onderzoek naar een oudere type stootbrander en infraroodstraler van Ascard (1998). In deze proef is de dodingsgraad vastgesteld middels het droog- en versgewicht tijdens het branden en vijf dagen daarna.
- Om een indruk te krijgen van het effect op slecht bestrijdbaar onkruid met beschermde groeipunten, zijn twee bestrijdingen uitgevoerd in engels raaigras (*Lolium perenne* L.) met de HOAF en TENNON bij maximum vermogen. Per brander werden dezelfde vier snelheden gebruikt als bij gele mosterd, maar met één herhaling.
- De HOAF en TENNON bij maximum vermogen zijn vergeleken bij 6 niveau's van gasverbruik per ha in vers geklapt groen aardappelloof, met één herhaling per behandeling. Het dodend effect werd vastgesteld middels het aantal aardappelstengels met nieuwe uitlopers per meter rug.

De resultaten worden weergegeven in grafieken met het bestrijdingsresultaat op de verticale as en de gasdosering (kg/ha) of rijksnelheid (km/u) op de horizontale as. De horizontale afstand tussen de curves van de branders (bij hetzelfde niveau van bestrijding, b.v. 80%) geeft de dus het verschil in energie-efficiëntie of de haalbare rijksnelheid weer.

Vanwege de herhalingen en de standaardisatie vormt de proef in gele mosterd de meest degelijke basis voor het vergelijken van energie-efficiëntie en capaciteit. De andere proeven hebben een oriënterend karakter. Hoofdstuk 3, 4 en 5 bespreken de bijzonderheden van elke proef afzonderlijk, inclusief de resultaten. In hoofdstuk 6 volgt de interpretatie van de resultaten, met aandacht voor de beperkingen van de machines en perspectieven voor verdere ontwikkeling.

2 Beschrijving onkruidbranders

2.1 HOAF Weedstar 100

Voor in deze machine is een rij met 30 vrijwel horizontaal naar achteren gerichte branders geplaatst met geforceerde luchttoevoer direct bij elke branderopening (figuur 2.1). De lange vlammen werken dicht bij het grondoppervlak en verhitten tevens een deel van het metalen rooster waarachter de naar beneden aflopende isolatie bevestigd is. De geïsoleerde zijwanden van de machine glijden over de grond en de achterzijde wordt afgesloten door sleepkettingen.

Voordat deze gebruikte machine (bouwjaar 1991) in de proef werd ingezet, zijn de instellingen door de fabrik aangepast in de volgens HOAF optimale stand. De niet-variabele gasdruk (1.5 bar) en het vermogen waren daardoor fors hoger dan bij normaal gebruik op trottoirs, begraafplaatsen en paden wenselijk is (volgens medewerkers LBW). Het gasverbruik was ook hoger dan de oorspronkelijke fabriekspecificatie (21.8 in plaats van 16 kg/u). Verdere gegevens staan in tabel 2.1 en 2.2.

Figuur 2.1 HOAF Weedstar 100



2.2 TENNON 20-200

In het gebruikte prototype zijn vier rijen van zeven door ECN ontwikkelde schuimbranders geplaatst, waarin het van boven toegevoerde gas-lucht mengsel ontbrandt (figuur 2.2). De ontsteking en gas- en luchttoevoer wordt elektronisch geregeld, waarbij het vermogen in vier trappen instelbaar is. Drie metalen loopwielen houden de straler op 17 cm hoogte boven het grondoppervlak. Om toetreding van (koelende) omgevingslucht te verhinderen is de ruimte tussen het branderframe en de grond over de hele omtrek afgeschermd met metalen kettingen.

Figuur 2.2 De TENNON 20-200 IR-straler (prototype)



Volgens metingen van Gaz de France bij een luchtoverschot van 5% (luchtgetal = 1.05) is de stralingsproductie het efficiëntst (59%, 89 kW/m²) bij 150 kW/m² brandervermogen en maximaal (53%, 186 kW/m²) bij 350 kW/m² brandervermogen. Omdat het prototype bij een luchtgetal van 1.05 vlamterugslag vertoonde (explosie van het gas-lucht mengsel in de toevoerbuizen), is bij de eerste bestrijding (aardappels en eerste bestrijding in gras) de luchtvermaat verhoogd naar 30%. Om oververhitting van de toevoerbuizen te voorkomen is tevens het vermogen in de hoogste stand teruggebracht naar 148 kW (273 kW/m²).

Toen bij de tweede bestrijding het vermogen werd opgevoerd tot 156 kW kwam vlamterugslag opnieuw voor en ontstonden scheuren in de schuimtegels. Achteraf bleek dat bij deze verandering het luchtgetal te laag was afgesteld (1.05). Hoewel het gaas onder de scheuren bij het ontsteken van de brander het eerst begonnen te gloeien, was er na ca. 20 seconden geen onregelmatige gloeiing meer zichtbaar. Omdat er ook geen blauwe vlammen ontstonden mag worden aangenomen dat de scheuren het resultaat van de tweede bestrijding (gele mosterd en tweede bestrijding gras) niet heeft beïnvloed.

Alle experimenten werden uitgevoerd met maximaal vermogen. In experimenten met gele mosterd werd daarnaast ook een lager vermogen gebruikt, om eventuele voordelen van een lagere stralertemperatuur (i.v.m. betere stralingsabsorptie door planten) te evalueren. De branderinstellingen en andere gegevens staan vermeld in tabel 2.1

Tabel 2.1 Gegevens van de gebruikte onkruidbranders

machine	HOAF	TENNON	
gewicht (kg, volle LPGtanks)	444	520	
effectieve werkbreedte (cm)	104	110	
totale lengte (cm)	113	160	
lengte stralend oppervlak (cm)	100	60	
effectief straleroppervlak (m2)	1.0	0.54	
machine	HOAF	TENNON	
instelling	fabriek	"hoog"	"laag"
LPGverbruik (kg/u) in aardappels en eerste bestrijding gras	21.8	10.6	-
LPGverbruik (kg/u) in mosterd en tweede bestrijding gras	21.8	11.2	8.6

2.3 Vermogen, infrarode straling en hete lucht

Het gasverbruik van de HOAF werd bepaald door de gehele machine voor en na 3 uur werking te wegen. Bij de TENNON werden losgekoppelde gastanks gewogen na 30 minuten (voor aardappels en eerste bestrijding in gras) en na anderhalf uur (voor gele mosterd en tweede bestrijding in gras) werking bij maximum vermogen. In verband met gevaar voor vlamterugslag lieten we bij de tweede verbruiksbepaling de machine na elke 10 minuten bedrijf even afkoelen. Vlamterugslag en onderbroken werking van de TENNON hebben in principe geen invloed op het gasverbruik, omdat de werkelijke verbruikstijd nauwkeurig werd bepaald. De eerste verbruiksmeting is mogelijk onnauwkeurig in verband met de korte verbruiksdur en de daaraan gekoppelde weegfout. Het gasverbruik van de TENNON bij laag vermogen is afgeleid uit gasdrukmetingen door EcoCeramics.

De energie die bij verbranding vrijkomt wordt op planten overgedragen via infrarode straling en hete lucht. Energieoverdracht door straling en door hete lucht zijn verschillende processen met verschillende sterke en zwakke punten. Straling verhit het materiaal "van binnenuit", terwijl de lucht tussen de straler en de plant niet deelneemt aan de overdracht. De energiestroomdichtheid kan zeer groot zijn en wordt bepaald door de stralertemperatuur. Nadelen zijn schaduwwerking van boven elkaar liggende bladeren, stralingsabsorptie door vrijkomende waterdamp en afname van de stralingsintensiteit op grotere afstand van de straler. Bij energie-overdracht met hete lucht is de warmtegeleiding in de plant de meest beperkende factor. Om voldoende warmte te laten indringen moet er voldoende tijd en temperatuurverschil tussen plant en aangrenzende lucht zijn. De

luchtstroomsnelheid nabij het plantoppervlak is dus van groot belang. De hoeveelheid overgedragen energie wordt zowel bij straling als hete lucht bepaald door de blootstellingstijd en de temperatuur.

Hoewel benutting van de voordelen van infrarode straling het uitgangspunt vormde bij de ontwikkeling van de TENNON, kon in dit onderzoek niet worden gemeten welk deel van de op planten overgedragen energie werd afkomstig is van IR straling en van de hete luchtstroom. Op basis van aannames over o.a. de temperatuur van het stralend oppervlak is de temperatuur en stroomsnelheid van de verbrandingslucht en het stralingsvermogen berekend, om een grove kwantitatieve indicatie te geven (tabel 2.2).

Tabel 2.2 geeft aan dat de HOAF veel minder straling produceert dan de TENNON, maar dat de straling van de afdekking van de HOAF iets beter door planten wordt geabsorbeerd, vanwege de lagere temperatuur (meer IR straling van een grotere, beter absorbeerbare golflengte).

Het grote luchtdebiet van de HOAF veroorzaakt grote luchtsnelheden: Als bij 15 cm afstand tussen oppervlak en afdekking (aannahme) de verbrandingslucht niet zou mengen met ingesloten lucht tussen planten en meegezogen omgevingslucht, zou de gemiddelde snelheid t.o.v. het grondoppervlak 11.6 km/u bedragen (zonder wrijving) bij een rijsnelheid van 7 km/u.

Als er een 5 cm dikke luchtlaag is ingesloten tussen planten, zou volledig gemengde lucht een temperatuur van 1170 °C hebben en een stroomsnelheid van 8.5 km/u (geen wrijving verondersteld). Bij lagere rijsnelheden neemt de per seconde bijgemengde hoeveelheid omgevingslucht af en heeft de verbrandingslucht een grotere snelheid t.o.v. het grondoppervlak (omdat de hete luchtstroom naar achteren gericht is, zie tabel 2.3).

Omdat het debiet van de verbrandingslucht van de TENNON relatief klein is en de luchtstroom uit het hele oppervlak komt, zal de stroming niet turbulent zijn. Daarom wordt de energie vooral door middel van infrarode straling op de planten overgedragen.

Tabel 2.2 Indicatieve kentallen voor beide onkruidbranders

	HOAF	TENNON hoog
gasverbruik (kg LPG /u) ^{a)}	21.8	11.2
luchtgetal ^{b)}	1.3	1.05
luchtdebiet (m3/min bij 20°C) ^{c)}	6.1	2.5
heet verbrandingsgasdebiet (m3/min)	48.4	16.5
luchttemperatuur ^{d)}	1934	1533
temperatuur oppervlak (°C) ^{e)}	500	1000
totaal vermogen (kW)	303	156
stralingsvermogen (kW) ^{f)}	47	68
hete-lucht vermogen (kW)	255	87
percentage straling	16%	44%
efficiëntie stralingsabsorptie planten ^{g)}	83-94%	60-76%

a) LPG met mengvolumeverhouding 40% butaan en 60% propaan, bovenste verbrandingswaarde 50 MJ/kg ofwel 106.4 MJ/m3 bij 20 °C, dichtheid 2.13 kg/m3 bij 20°C. Samenstelling LPG varieert van 40-70% propaan.

b) HOAF: schatting, TENNON: ingestelde waarde bij tweede bestrijding

c) berekend uit gasverbruik, luchtgetal, 27.7 m3 lucht per m3 LPG bij stochiometrische verbranding, dichtheid LPG gas: 2.13 kg/m3.

d) berekend op basis van heteluchtvermogen. Dat is het totaal vermogen min het stralingsvermogen (dus geen warmteverliezen in de machine). Bij 70% rv en 20°C, rekening houdend met water in verbrandingsgassen. Meting ECN stralers: 1550°C

e) HOAF: optimistische schatting, sterke ruimtelijke variatie. Gemeten temperatuur boven 400°C grondoppervlak: 600-700°C. TENNON: berekend op basis van eerder gemeten temperatuur verbrandingslucht (1550°C) en straleroppervlak (950°C) en emissiviteit=0.85.

f) HOAF: berekend uit temperatuur en oppervlak van de afdekking, met emissiviteit=0.85, plus 10% van het totale vermogen dat de vlam als straling afgeeft. ECN: 53% stralingsvermogen gemeten bij 300 kW/m2.

g) berekend minimum en maximum op basis van emissiespectrum zwart lichaam (wet van Planck) en temperatuur oppervlak, en absorptiespectra van mais, sla, ui, tarwe en papegaaiekruis uit Wolfe & Zissis (1985). Gele mosterd en gras liggen hier mogelijk tussen.

Tabel 2.3 Indicatieve berekening van temperaturen en stroomsnelheden van verbrandingsgassen gemengd met de tussen planten ingesloten lucht.

rij snelheid (km/u)	dikte ingesloten luchtlaag (cm)	HOAF		TENNON hoog	
		gemiddelde temperatuur (°C)	gemiddelde luchtstroomsnelheid (km/u) ^{a)}	gemiddelde temperatuur (°C)	gemiddelde luchtstroomsnelheid onder zijkant (km/u) ^{b)}
0	0	1934	18.6	1533	3.7
1.7	5	1667	15.4	1096	3.0
4.4	5	1371	11.4	767	2.4

a) snelheid tegengesteld aan de rijrichting, machinebreedte 104 cm, 15 cm afstand tussen grond en afdekking.

b) zijwaartse snelheid onder de framebalk die 8 cm boven het grondoppervlak hangt, lucht stroomt naar alle richtingen uit en is over de hele omtrek gelijk verondersteld.

2.4 Geluidsmetingen

Bij stil weer (omgevingsgeluid 39.0 dBa) werden geluidsmetingen gedaan in het open veld (HOAF en TENNON met hoog vermogen) en op een betonnen vloer voor een loods met gesloten deuren (alleen HOAF). De TENNON brander werd niet op beton gemeten omdat het geluidsniveau in het veld op 7.5 m afstand naast de machine te gering is voor goede metingen (3.7 dBa verschil terwijl minimaal 10 dBa verschil nodig is, tabel 2.4). Hoewel de HOAF brander veel meer geluid maakte, was in de cabine het trekker geluid duidelijk sterker dan het brander geluid. Het geluidsniveau voor de omgeving blijft binnen normale grenzen. Het geluidsniveau van de HOAF en kleine Iseki trekker gezamenlijk was op beton hoger dan in het veld (resp. 75.7 en 70.0 dBa).

Tabel 2.4 Geluidsniveau (dBa) van beide branders en een kleine trekker in het open veld bij 39.0 dBa omgevingsgeluid

	HOAF	TENNON hoog	Iseki 530
7.5 m afstand opzij	64.9	42.7	63.3
recht boven brander	79.7	56.5	-
in cabine	76.1	-	77.2

3 Dosis-respons experiment in gele mosterd

3.1 Materiaal en methoden

De op 19 augustus gezaaide gele mosterd (*Sinapis alba* L.) werd bestreden op 1 september, toen het vierde blad bij de meeste planten juist verschenen was. Op dat moment was naar schatting 25-35% van het oppervlak bedekt door een verse plantmassa van 171 g/m² met 11.5% drogestof (figuur 3.1). Het proefveld werd verdeeld in vier blokken met elk 12 velden van 1.5 x 20 meter. De eerste meter en de laatste vier meter van elk veld zijn gebruikt als draairuimte voor de trekker en als startplaats waarop de hoogte van de brander werd ingesteld en de brander in bedrijf werd gesteld. Binnen elk blok werden de 11 branderbehandelingen en een onbehandeld object verloot over de veldjes.

Figuur 3.1 Gele mosterd op de dag van bestrijding



Er zijn vier snelheidstrappen gekozen, die gekoppeld zijn aan het gasverbruik per hectare, de zogenaamde gasdosis (tabel 3.1). De HOAF en TENNON bij maximum vermogen ("TENNON hoog") werden bij vier snelheden toegepast, maar bij de TENNON bij lager vermogen (TENNON "laag") werd de hoogste snelheidstrap (trap 1)

Tabel 3.1 Rijsnelheden en gasdoses bij de branderproef in gele mosterd.

trap	rijsnelheid (km/u)		gasdosis (kg LPG/ha)		
	HOAF	TENNON	HOAF	TENNON hoog	TENNON laag
1	7.0	4.4	30.0	23.3	-
2	4.4	2.7	48.0	37.3	28.6
3	2.7	1.7	76.9	59.6	45.7
4	1.7	1.1	122.8	95.2	73.0

weggelaten. De behandeling werd uitgevoerd bij zwaar bewolkt rustig weer (21°C, windkracht 2 Bft, 78%rv, zonnestraling 767 J/cm²) en gevolgd door een zonnige dag.

Op de vijfde dag na behandeling werden veldjes in het eerste blok gefotografeerd (figuur 3.4 en 3.5). Toen bleek dat het moeilijk te beoordelen was of een beschadigde plant definitief dood zou gaan, is besloten om per veld in een aantal 80 cm lange stroken planten bij de grond af te knippen en de doding te bepalen op basis van het versgewicht en drooggewicht van de afgeknipte planten. Er werd begonnen met oogsten zodra de mosterd goed droog was. Om vóór het invallen van de avonddauw klaar te kunnen zijn werden maar drie volledig gedode veldjes geoogst. Er werden een variabel aantal representatieve gewasrijstroken van 80 cm lengte geoogst, voldoende om een betrouwbare wegingen te kunnen doen (4 x 80 cm onbehandeld tot 12 x 80 cm bij volledige doding). Op het eind van de dag werd van elk onbehandeld veldje een tweede monster van 4 x 80 cm genomen.

Als dodingsparameter gebruiken we het percentage van het droog plantgewicht dat dood is. We gaan er daarbij vanuit dat het dode materiaal hetzelfde drogestofgehalte heeft als de volledig gedode veldjes (drie metingen, gemiddeld 82.1% drogestof), terwijl het drogestofgehalte van levend materiaal overeenkomt met dat van de onbehandelde veldjes (acht metingen, gemiddeld 9.9% drogestof). De dodingsparameter (%droogdood) wordt dus als volgt berekend:

$$\%droogdood = 100\% - \frac{\frac{\%dsonbehandeld}{100\% - \%dsonbehandeld} \cdot (\text{versgewicht} - \text{drooggewicht}) \cdot 100\%}{\text{drooggewicht}}$$

Met behulp van niet-lineaire modellen uit eerder branderonderzoek door Ascard (1997, 1998) wordt voor beide branders de snelheid en de gasdosering berekend bij 50% en 95% doding. De modellen zien er als volgt uit:

$$\%droogdood = \frac{100\%}{1 + \left(\frac{ED50}{\text{dosis}}\right)^b} \qquad \%droogdood = \frac{100\%}{1 + \left(\frac{\text{snelheid}}{ES50}\right)^b}$$

Hierin is ED50 het gasverbruik bij 50% doding en ES50 de rijsnelheid bij 50% doding. De helling van de curves wordt bepaald door b, waarvan we veronderstellen dat die voor alle branders dezelfde waarde heeft.

In een vergelijkend onderzoek van Ascard (1998) met een ouder type stootbrander (Catter) en een ouder type infraroodstraler (AgroDynamic V6) werd het relatieve versgewicht van behandelde ten opzichte van onbehandelde veldjes als dodingsparameter gebruikt. Omdat die proeven ook in het 4-blad groeistadium van gele mosterd werden gedaan, zijn ter vergelijking ook de snelheid en gasdosering bij 50% en 95% versgewichtreductie berekend.

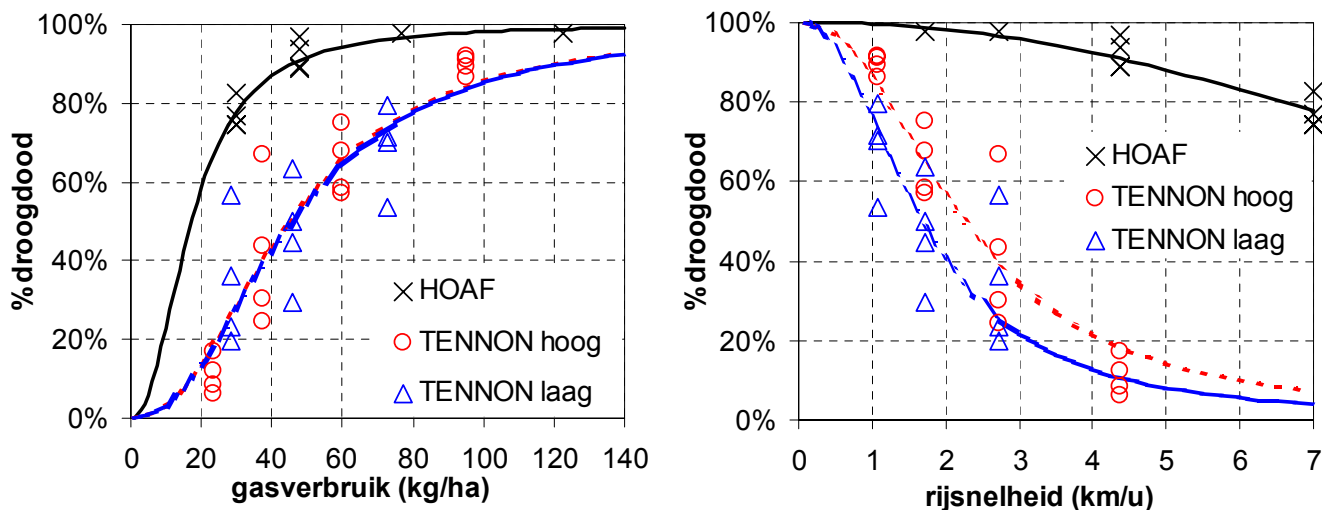
3.2 Resultaten

Uit tabel 3.2 en figuur 3.2 blijkt dat de HOAF duidelijk minder LPG nodig heeft om in gele mosterd hetzelfde niveau van bestrijding te bereiken als de TENNON. De vermogens-instelling van de TENNON had daarbij geen invloed op de efficiëntie. De combinatie van een ruim twee maal zo groot rendement en het dubbele vermogen zorgt ervoor dat de haalbare rijsnelheid van de HOAF ruim vijf maal groter is dan die van de TENNON op maximaal vermogen.

Tabel 3.2 Rijsnelheid (km/u) en gasverbruik (kg LPG/ha) waarbij 50% en 95% gele mosterd wordt bestreden, op basis het percentage dode drogestof (%droogdood).

	doding	HOAF	TENNON hoog	TENNON laag
rijsnelheid	50%	12.21	2.25	1.70
	95%	3.29	0.61	0.46
	doding	HOAF	TENNON hoog	TENNON laag
gasverbruik	50%	17.2	45.3	46.1
	95%	63.9	168.2	171.1

Figuur 3.2 Bestrijdingseffect in gele mosterd in relatie tot gasverbruik en rijsnelheid, op basis van de fractie van de droge plantmassa dat uit dood materiaal bestaat.



Als we naar de relatieve afname van het versgewicht kijken (tabel 3.3) komen we tot dezelfde conclusie. Hier lijkt de TENNON bij lagere vermogensinstelling 24% efficiënter te zijn als bij maximaal vermogen, maar dit verschil is statistisch niet betrouwbaar.

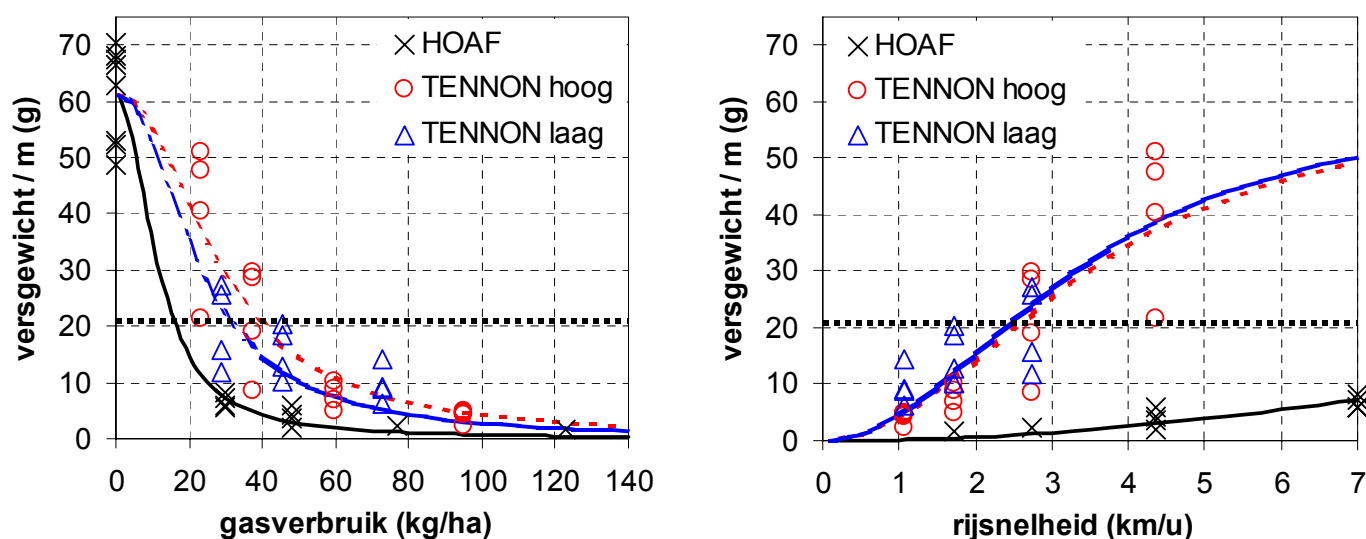
Tabel 3.3 Rijsnelheid (km/u) en gasverbruik (kg/ha) waarbij het versgewicht van gele mosterd resp 50% en 95% afneemt. Gegevens Catter en AgroDynamic overgenomen uit Ascard (1998). HOAF en TENNON gebruiken LPG; Catter en AgroDynamic propaan.

	doding	HOAF	TENNON hoog	TENNON laag	Catter	AgroDynamic
rijsnelheid	50%	18.29	3.56	3.37	3.97	3.24
	95%	4.44	0.86	0.82	0.94	0.77
	doding	HOAF	TENNON hoog	TENNON laag	Catter	AgroDynamic
gasverbruik	50%	11.5	28.6	23.1	17.2	19.2
	95%	47.3	118.0	95.3	72.8	81.3

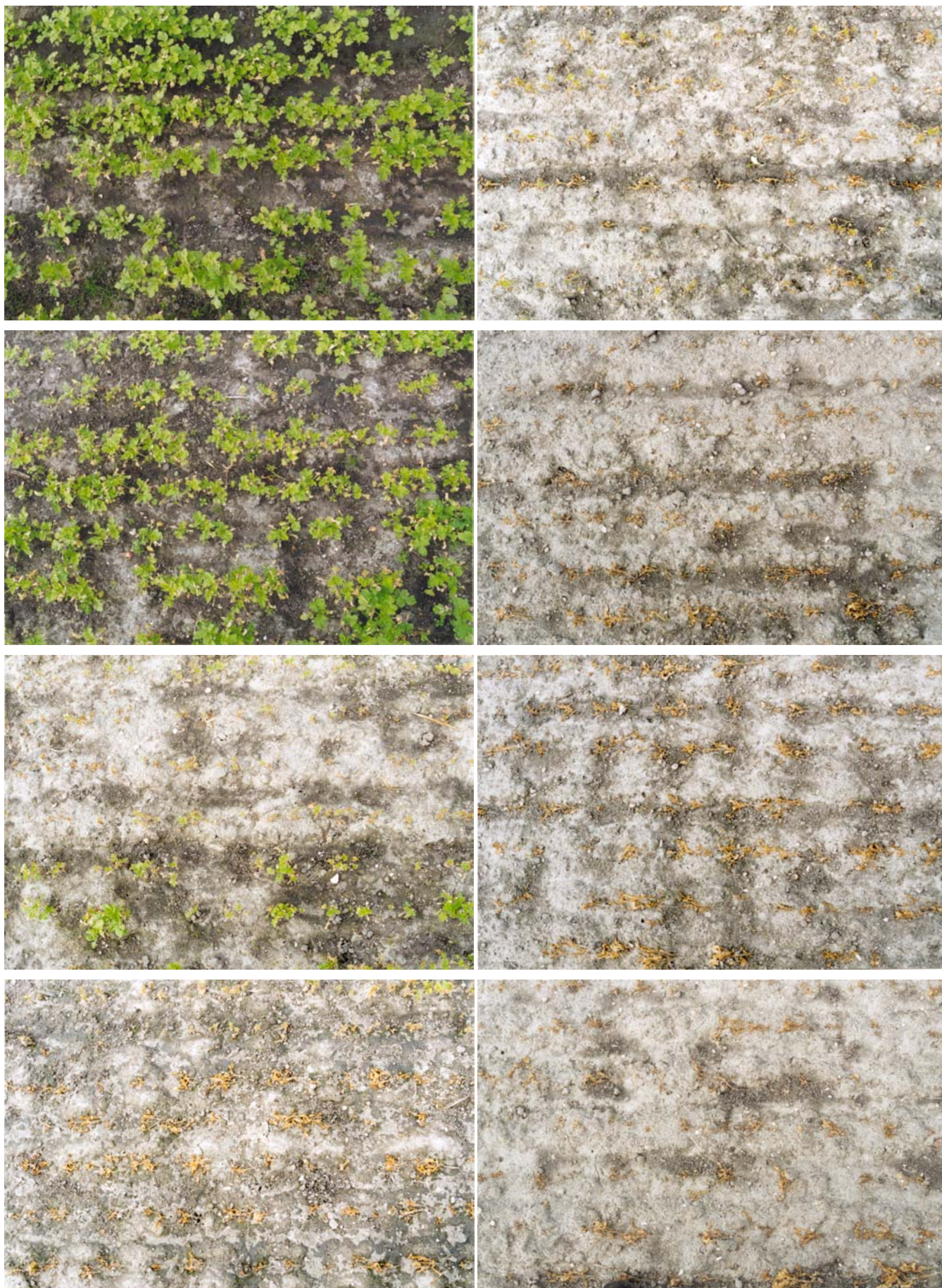
De HOAF is efficiënter dan het oudere type stootbrander (Catter) in het onderzoek van Ascard (1998). Deze Catter (gemaakt door Borst B.V. in Apeldoorn) heeft twee rijen naar achteren gerichte gas-fase branders zonder geforceerde luchttoevoer, vooraan onder een geïsoleerde afdekking. In de proef was maar één rij branders in bedrijf, met een propaanverbruik van 6.82 kg per meter werkbreedte per uur. De resultaten zijn vergelijkbaar omdat propaan en LPG ongeveer dezelfde verbrandingswaarde hebben (50 MJ/kg).

De AgroDynamic V6 is gemaakt door HOAF en bestaat uit meerdere zij-aan-zij gemonteerde, 1.25 m lange keramische stralingselementen. Een propaanverbruik van 6.23 kg per meter werkbreedte per uur komt dus overeen met 69.2 kW/m². Dit oude type IR straler was in de proef van Ascard (1998) vergelijkbaar met de Catter, maar is efficiënter dan de TENNON.

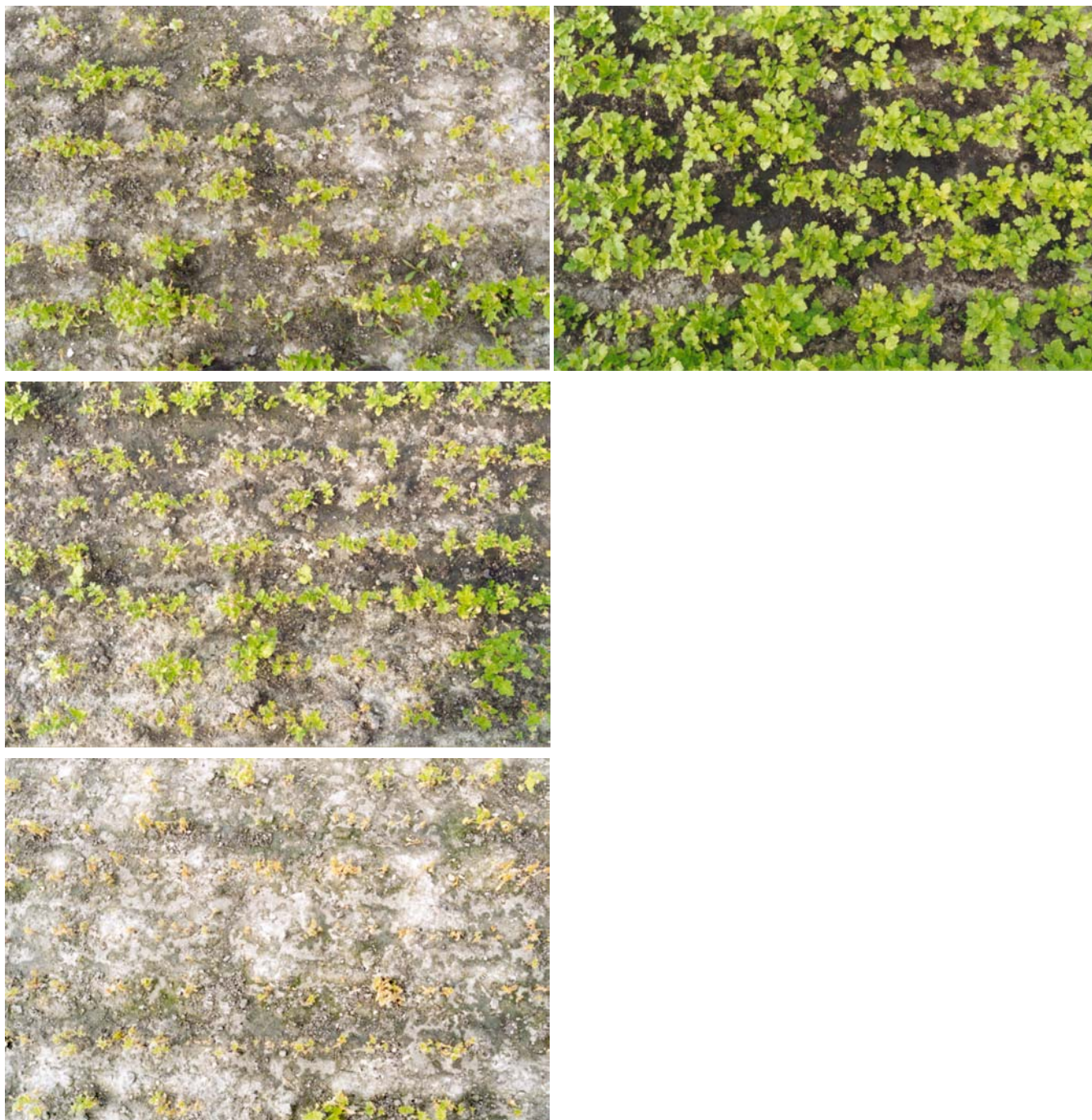
Figuur 3.3 Het versgewicht van gele mosterd per meter rij op de vijfde dag na bestrijding, in relatie tot gasverbruik en rijsnelheid. De dikke horizontale stippellijn geeft het versgewicht op het moment van bestrijding.



Figuur 3.4 Bestrijdingseffect vijf dagen na behandeling met de TENNON straler bij hoog vermogen (links) en de HOAF brander (rechts) met snelheidstrappen 1 (boven) t/m 4 (onder)(zie tabel 3.1).



Figuur 3.5 Bestrijdingseffect vijf dagen na behandeling met de TENNON straler bij laag vermogen (links) met snelheidstrappen 2 (boven) t/m 4 (onder)(zie tabel 3.1). Rechts: onbehandeld.



4 Doding gras

4.1 Materiaal en methoden

De HOAF en TENNON bij hoog vermogen werden bij dezelfde vier snelheden ingezet als bij de proef in gele mosterd, met één herhaling per snelheidstrap en twee onbehandelde veldjes. De bestrijding werd twee maal uitgevoerd: op 17 augustus en 1 september. Bij de eerste keer was de TENNON ingesteld op een lager vermogen dan bij de tweede keer (gasverbruik resp. 10.6 en 11.2 kg LPG / u).

Tabel 4.1 Rijsnelheden en gasdoses bij de branderproef in gras.

trap	rijsnelheid (km/u)		gasdosis (kg LPG/ha)		
	HOAF	TENNON	HOAF	TENNON hoog 17-8-99	TENNON hoog 1-9-99
1	7.0	4.4	30.0	22.1	23.3
2	4.4	2.7	48.0	35.3	37.3
3	2.7	1.7	76.9	56.4	59.6
4	1.7	1.1	122.8	90.1	95.2

Het proefveld met engels raaigras (*Lolium perenne* L.) werd verdeeld in 10 stroken van 1.5 x ca. 10 m, dwars op de zaairichting, zodat de ruimtelijke variabiliteit in grasbezetting in alle veldjes aanwezig was. Bij de eerste bestrijding was het gras nog niet volgroeid en was naar schatting 70 - 85% van het oppervlak met gras bedekt, met een versmassa variërend van 0.58 tot 0.88 kg/m² (4 steekproeven, 19.8% drogestof). Bij de tweede bestrijding was de grasbezetting per veld verschillend (figuur 4.4), als gevolg van een uiteenlopend effect van de eerste bestrijding. In verband met de grote ruimtelijke variabiliteit van de grasbezetting zijn geen biomassabepalingen uitgevoerd.

Omdat het om een oriënterend experiment gaat is de doding kwalitatief beoordeeld op basis van foto's op de zesde dag na de eerste bestrijding en de vijfde dag na de tweede bestrijding. In de avond van de middag waarop de tweede bestrijding werd uitgevoerd is op 30 – 52 plaatsen per strook het fotosynthese-rendement gemeten met een EARS-PPM fluorescentiemeter. Deze meter wordt ook wel gebruikt om het effect van bespuitingen te bepalen. Onbehandelde, gezonde grasplanten hadden een fotosyntheserendement van ca. 68%. Als het rendement lager is dan ca. 15% is het chlorofyl in het blad niet voldoende werkzaam om de plant in leven te houden. Bij soortgelijke metingen in gele mosterd was er een goed verband tussen het percentage dood plantgewicht (%droogdood) en het percentage van de planten met een fotosyntheserendement kleiner dan 20%. Bij het gras-experiment geeft deze parameter een indicatie voor het dodend effect direct na bestrijding (figuur 4.2).

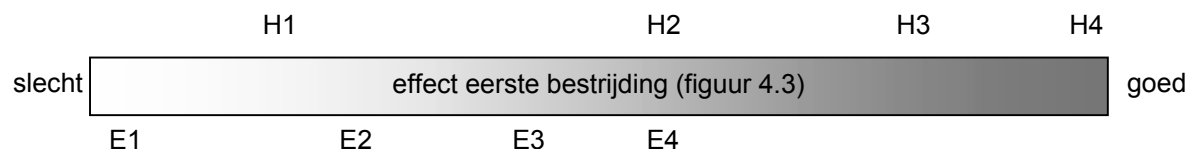
Figuur 4.1 Gras in onbehandeld veld bij de eerste bestrijding (links) en tweede bestrijding (rechts).



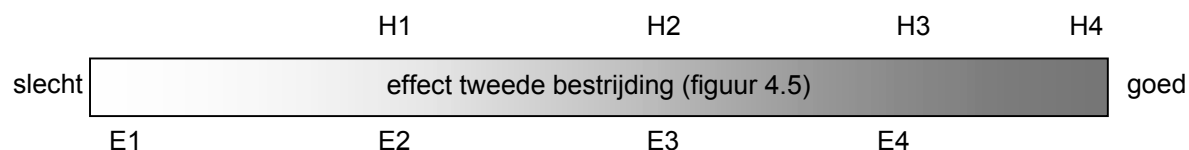
4.2 Resultaten

Het effect van de eerste bestrijding was niet voldoende om het gras te doden (figuur 4.3 en figuur 4.4). Na een tweede bewerking kon met de HOAF bij 1.7 en 2.7 km/u (totaal verbruik resp. 246 en 154 kg LPG/ha) en met de TENNON bij 1.1 km/u (totaal verbruik 185 kg LPG/ha) een bevredigend resultaat worden bereikt (figuur 4.5).

De onderstaande balken geven het beeld uit figuur 4.3 en 4.5 op een vergelijkende manier weer. De letters staan voor de branders (H = HOAF, E = TENNON met hoog vermogen) en de getallen voor de snelheid- en gasverbruik-trappen uit tabel 4.1. Bij de eerste bestrijding kon met de HOAF duidelijke sneller én efficiënter worden gewerkt. Behandeling H2 (4.4 km/u, 48 kg LPG/ha) gaf immers een vergelijkbaar bestrijdingsresultaat als E4 (1.1 km/u, 90 kg LPG/ha).

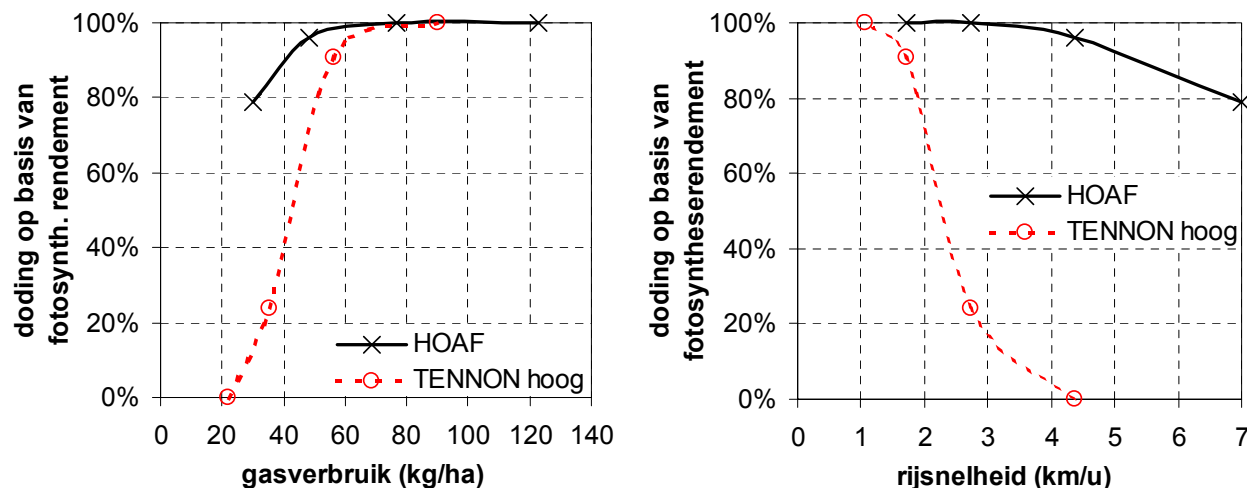


Hoewel de HOAF na de tweede bestrijding qua rijsnelheid nog steeds duidelijk in het voordeel is, zijn de verschillen in gasverbruik minder groot. Het feit dat de TENNON bij één snelheidstrap lager een vergelijkbaar resultaat levert als de HOAF, betekent dat de HOAF bij een vergelijkbaar resultaat ongeveer 15% minder energie gebruikt en ongeveer 2.6 maal zo snel kan werken als de TENNON. Het grootste deel van het haalbare snelheidsverschil komt doordat de HOAF ongeveer twee maal zoveel vermogen heeft als de TENNON. Hoewel fluorescentiemetingen direct na de tweede bestrijding (figuur 4.2) tot dezelfde conclusie leidt, komt uit deze grafiek een groter verschil tussen de machines naar voren dan uit de foto's die vijf dagen later zijn gemaakt.



Vooraf in situaties met veel bladmassa, zoals bij de eerste bestrijding (figuur 4.1) lijkt doordringing van de hitte tot onder in het bladerdek van groot belang voor de effectiviteit. We hebben de indruk dat de hete verbrandingsgassen van de HOAF bij lagere rijsnelheid beter kunnen indringen in het bladerdek, dankzij een grote turbulente hete luchtstroom. Bij hoge snelheden van de HOAF en bij het lage verbrandingslucht-debiet van de TENNON zou de tussen de bladeren ingesloten lucht minder kunnen worden verstoord, zodat deze luchtlaag als een isolatie zou kunnen gaan werken. Infrarode straling wordt niet gehinderd door een isolerende luchtpakket, maar wel door onderlinge beschaduwing van de bladeren. Figuur 4.3 en 4.5 laten zien dat een langere blootstellingstijd (=lagere rijsnelheid) het effect op bladeren dicht bij het oppervlak vergroot. Verschillen in grassdichtheid leken de effectiviteit van de TENNON meer te beïnvloeden dan die van de HOAF (figuur 4.5 links, tweede foto).

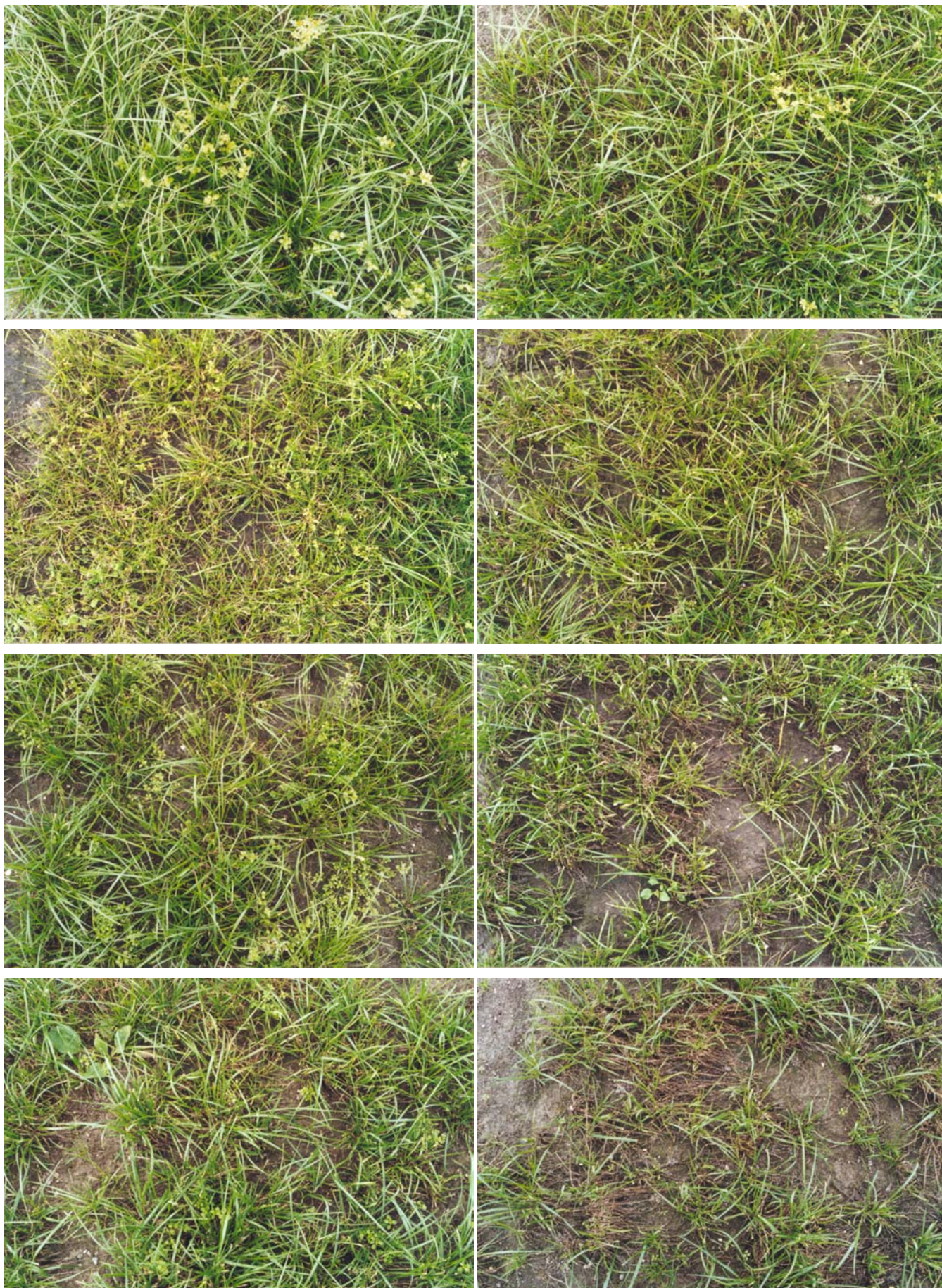
Figuur 4.2 Effectiviteit direct na de tweede bestrijding in gras in relatie tot gasverbruik en rijsnelheid. Op de verticale as staat het percentage planten met minder dan 20% fotosyntheserendement.



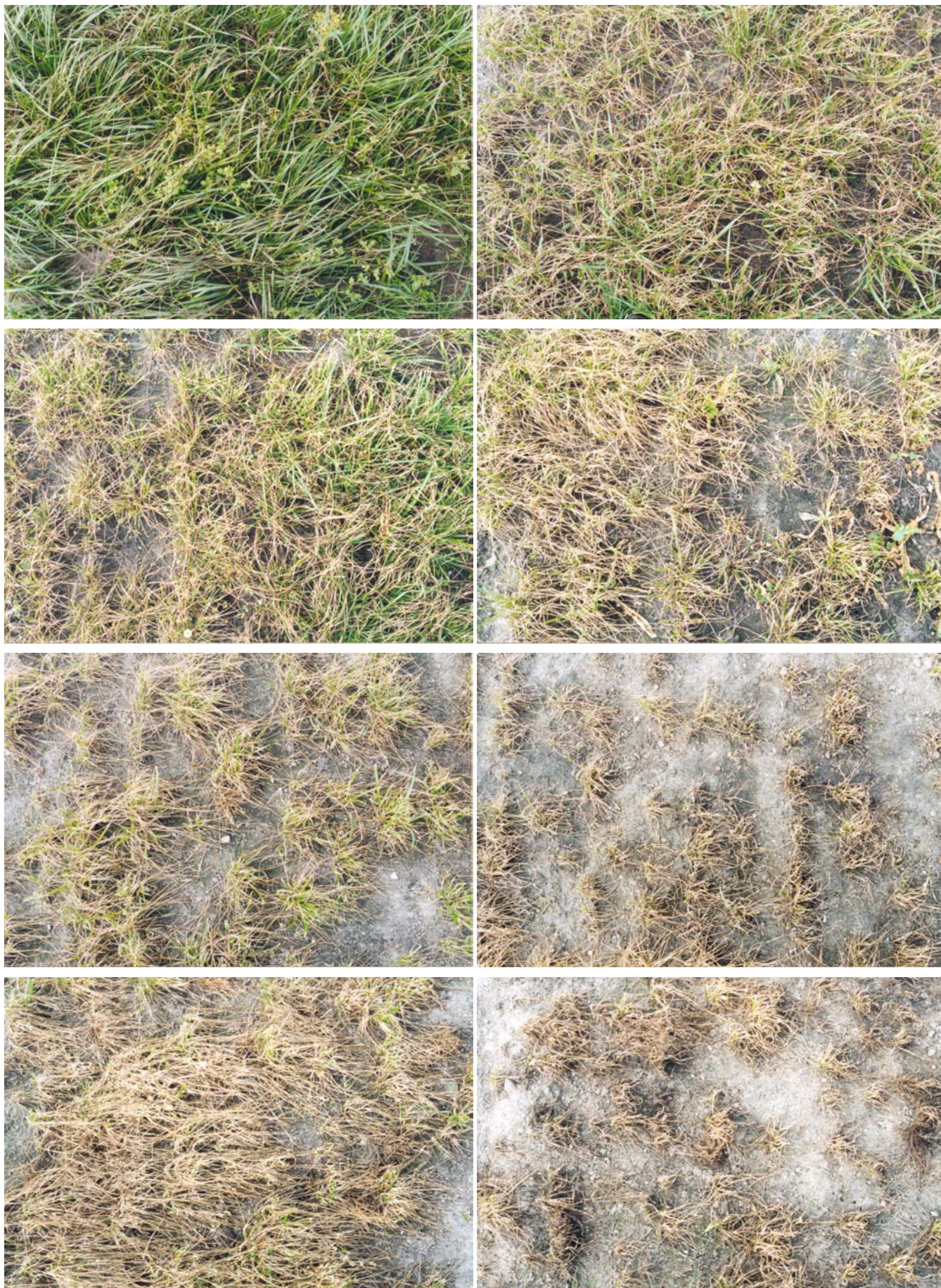
Figuur 4.3 Bestrijdingseffect zes dagen na de eerste behandeling met de TENNON straler (links) en de HOAF brander (rechts) met snelheidstrappen 1 (boven) t/m 4 (onder)(zie tabel 4.1).



Figuur 4.4 Bestrijdingseffect 15 dagen na de eerst behandeling met de TENNON straler (links) en de HOAF brander (rechts) met snelheidstrappen 1 (boven) t/m 4 (onder)(zie tabel 4.1).



Figuur 4.5 Bestrijdingseffect vijf dagen na de tweede behandeling met de TENNON straler (links) en de HOAF brander (rechts) met snelheidstrappen 1 (boven) t/m 4 (onder)(zie tabel 4.1).



5 Loofdoding van pootaardappelen

5.1 Materiaal en methoden

De gebruikte machines zijn niet ontworpen voor niet-chemische loofdoding in de aardappelteelt. Desondanks werd een oriënterende proef uitgevoerd omdat IR straling mogelijk dieper in het loof zou doordringen, en dus de groeipunten efficiënter zou kunnen doden dan hete verbrandingsgassen.

Toen de consumptie-aardappelen op 17 augustus werden geklapt vertoonde het gewas nog geen sporen van afsterving, zodat het gewas groener was dan in een voor de pootgoedteelt representatieve situatie. De resterende loofstengels waren 10-40 cm lang en stonden a.g.v. het klappen 20-40° voorover in de rijrichting. Er werd een 160 m lange strook van twee aardappelruggen geklapt aan de rand van het perceel, zodat het loof opzij kon worden afgevoerd. Op de dag van behandeling was het rustig, zwaar bewolkt weer (17°C, 66%rv, straling 923 J/cm²), met vier mm regenval in de ochtend. Na uitvoering van de behandelingen tijdens de droge middag, volgden drie regenachtige dagen.

Omstreeks drie uur na het klappen werden met de TENNON bij hoog vermogen zes stroken van ca. 10 meter lengte afgebrand, met een oplopende rijnsnelheid (tabel 5.1). Om te voorkomen dat de stengels de straler-elementen zouden beschadigen, werd het stralend oppervlak afgesteld op 40 cm boven de top van de ruggen (figuur 5.1). Hoewel het tijdens de behandelingen met de TENNON niet hard waaide (daggemiddelde 3 Bft), werd de zijkant van de brander afgeschermd met een groot plastic zeil. Luchtstromen onder de brander zouden immers de straler kunnen koelen.

Ongeveer vijf uur na het loofklappen werden zes volgende stroken met de HOAF behandeld,

Figuur 5.1 De TENNON straler met speciale steunwielen in geklapt aardappelloof



Figuur 5.2 HOAF Weedstar 100 in geklapt aardappelloof



waarbij de rijssnelheden een factor 2.18 hoger waren dan bij de TENNON. De zes trappen in het gasverbruik komen daardoor overeen (tabel 5.1). De hoogte van de HOAF werd zodanig afgesteld dat de glijstroken de rugen net niet raakten (figuur 5.2).

Alle behandelingen (brander - snelheid combinaties) zijn slechts op één strook uitgevoerd, aangevuld met een onbehandelde strook.

Op 6 september, de twintigste dag na behandeling, werd het dodingseffect beoordeeld door het aantal stengels met één of meerdere nieuw uitgelopen groeipunten te tellen. Bij pootaardappelen is groen loof namelijk een invalsmogelijkheid voor virussen die worden overgebracht door luizen.

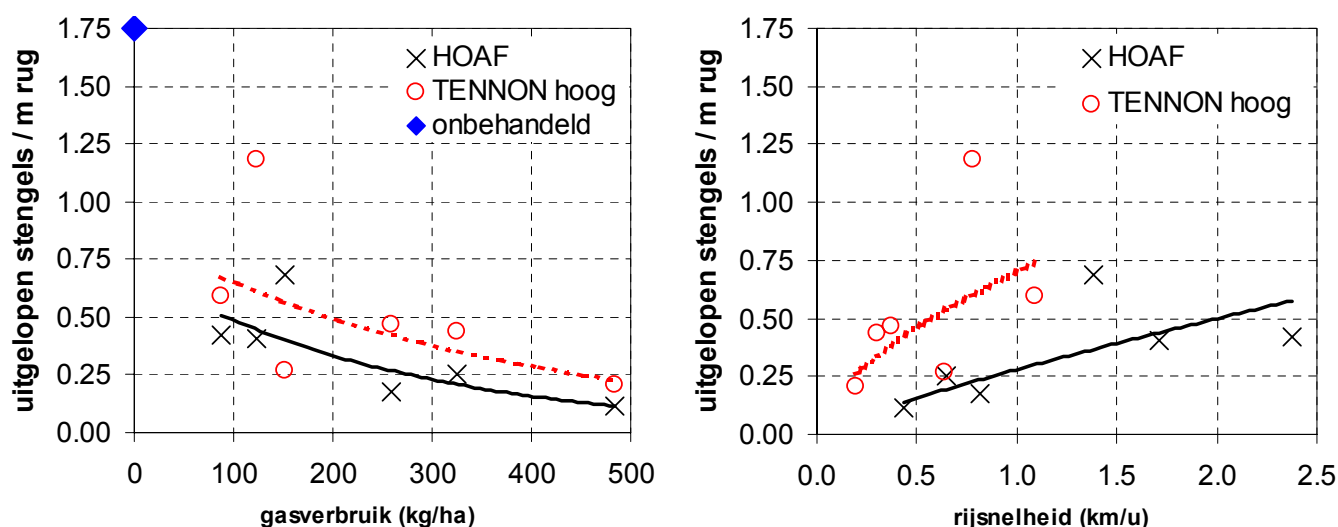
Tabel 5.1 Gasdoses en rijssnelheden bij de branderproef in geklapt aardappelloof.

trap	gasdosis (kg LPG/ha)	rijssnelheid (km/u)	
		TENNON hoog	HOAF
1	484	0.20	0.43
2	324	0.30	0.65
3	258	0.37	0.81
4	152	0.64	1.38
5	123	0.78	1.71
6	88	1.09	2.38

5.2 Resultaten

In tegenstelling tot gele mosterd en gras waren er in deze proef grote afwijkingen van de effectiviteit ten opzichte van de trends, weergegeven in figuur 5.3. Daaruit blijkt dat de HOAF zowel een efficiëntere als een snellere loofdoder is. Hoewel de omvang van de verschillen niet goed aan te geven is vanwege de grote spreiding, gaf de HOAF bij alle behandelingen behalve één (152 kg LPG/ha) een betere doding dan de TENNON bij hetzelfde gasverbruik.

Figuur 5.3 Dodingseffectiviteit van de branders in aardappelloof, 20 dagen na behandeling. Een groter aantal uitgelopen stengels per meter ruglengte betekent een slechter resultaat.



Bij deze resultaten dient men te bedenken dat het loof groener was dan bij pootaardappels gebruikelijk is en dat de potenties van de TENNON straler niet maximaal konden worden benut. Doordat het gewas nog niet aan het afsterven was en dus relatief weinig energie in knolvorming had geïnvesteerd, waren er op het onbehandelde veld opvallend weinig uitlopers (figuur 5.4). Door de geringe vitaliteit van de geklapte stengels zijn waarschijnlijk ook de verschillen tussen de gasdoseringstrappen kleiner dan onder normale omstandigheden. Hierdoor heeft natuurlijke variatie een relatief grote invloed.

Doordat het stralend oppervlak van de TENNON ongeveer 40 cm boven de top de rug staat, is de stralingsintensiteit op het oppervlak lager dan wanneer de machine op haar eigen loopwielen rijdt. Bij een netto stralend oppervlak van 62 cm lang en 107 cm breed dat midden boven twee rugen hangt (rugafstand 75 cm) zou slechts 18% van het stralingsvermogen terechtkomen op de twee 25 cm brede

toppen van de rug (methode berekening in bijlage A). Omdat de stengels boven de rug uitsteken staan zij bloot aan een hogere stralingsintensiteit. Omdat een stralend oppervlak in alle richtingen straalt is de stralingsintensiteit onder het midden van dit oppervlak ongeveer de helft van de uitgezonden stralingsintensiteit. Daarom is het niet vreemd dat de meeste uitlopers zich onderaan de stengels bevonden.

Als de machine op loopwielen rijdt hangen de stralers ca. 12 cm boven het grondoppervlak. Hierdoor komt 75% van de straling recht onder het stralend oppervlak terecht.

Figuur 5.4 Het onbehandelde veld 20 dagen na loofklappen



6 Discussie

De centrale vraag in dit onderzoek is of de verbeterde benutting van infrarode straling (het basis-idee achter de TENNON straler) perspectief biedt voor een kostprijsverlaging bij onkruidbranden op verhardingen. Op het eerste gezicht lijkt het antwoord op deze vraag ontkennend te zijn, omdat de HOAF in alle drie situaties beter presteerde dan de TENNON straler, zowel wat betreft gasverbruik als capaciteit. In dit hoofdstuk proberen we te verklaren waarom de prestaties van de TENNON achterbleven bij de verwachting en geven we mogelijke verbeteringen aan. Daarvoor moeten we ons verdiepen in de rol van straling en verbrandingsgassen bij de verhitting van planten. Daarna bespreken we de perspectieven voor gebruik van beide typen machines op verhardingen en in de landbouw.

6.1 De rol van infrarode straling en hete verbrandingsgassen

In hoofdstuk 2.3 is het aandeel van het totale vermogen dat als straling wordt afgegeven geschat op 16% voor de HOAF en 44% voor de TENNON. Uit de grove berekeningen kwam ook naar voren dat de luchtsnelheid bij de HOAF vele malen hoger was dan bij de TENNON. Hieronder noemen we een aantal aspecten die de werkzaamheid van de straling en hete luchtstroom bij beide branders bepalen.

Omdat een stralend oppervlak naar alle kanten straling uitzendt komt een deel van de straling niet op het grondoppervlak terecht en is de stralingsintensiteit op het grondoppervlak midden onder de straler groter dan onder de rand. In gras en mosterd was het bestrijdingseffect aan de rand van de machine inderdaad zichtbaar minder dan midden onder de machine. De indringing van koude lucht door de kettingen is hierbij waarschijnlijk van ondergeschikt belang geweest.

De hoge stralertemperatuur geeft relatief meer straling met kleinere golflengten, die slecht worden geabsorbeerd door groene planten (tabel 2.2, Kurstjens, 1999). Ongeveer de helft van de niet-geabsorbeerde straling dringt dieper in het plantenweefsel door of verwarmt onderliggende bladlagen. Daardoor hoeft de kleinere absorbeerbaarheid van de door de TENNON geproduceerde straling geen groot nadeel te zijn. Bovendien is een hoge stralertemperatuur van groot belang voor het stralingsvermogen.

Naarmate een kleiner deel van het grondoppervlak bedekt is met blad, blijft een groter deel van de IR straling onbenut. Grond absorbeert infrarode straling en wordt daardoor waarschijnlijk warmer dan bij warmteoverdracht door hete lucht. Als hete lucht over niet begroeid grondoppervlak strijkt gaat een klein deel verloren naar de grond, maar de resterende energie blijft dus beschikbaar voor overdracht op planten. Dit verschijnsel verklaart ook dat het verschil tussen TENNON en HOAF bij gras kleiner was dan bij gele mosterd, waarbij 65-75% van de grond niet met blad bedekt was. Op gedeeltelijk begroeide oppervlakken heeft hete lucht daarom een voordeel boven straling.

Een deel van de uitgezonden straling wordt geabsorbeerd door de waterdamp die vrijkomt bij de verbranding en uit beschadigd blad. Omdat planten vooral uit water bestaan en dus (onder andere) dezelfde golflengten absorberen, gaat dit ten koste van de bestrijding. We weten niet hoe groot dit effect is, maar figuur 6.1 geeft de indruk dat er veel waterdamp vrijkomt. Het feit dat in de

Figuur 6.1 De TENNON bij de tweede bestrijding in gras, rijsnelheid 1.1 km/u.



papierindustrie het water dat vrijkomt bij het drogen van papier wordt weggeblazen, geeft aan dat het een belangrijke oorzaak zou kunnen zijn voor de verminderde efficiëntie van de TENNON straler.

Bij de TENNON is het debiet van de verbrandingslucht te klein om de vrijkomende waterdamp onder de stralers weg te blazen en te weinig turbulent om door te dringen in dichte bladmassa's. Als er veel lucht is ingesloten tussen de bladmassa zal de temperatuur bij het oppervlak te laag zijn om binnen een korte tijd onkruid te verhitten. Naarmate de blootstellingsduur langer is lijkt de effectiviteit echter te verbeteren en dringt de hitte dieper in dichte plantmassa's door. Dit zou ook de reden kunnen zijn voor de betere prestaties van de in hoofdstuk 3 genoemde Agrodynamic IR straler met 1.25 m lange elementen. Uit deze experimenten kan echter niet worden afgeleid of verlenging van de stralers meer soelaas biedt dan het opvoeren van het vermogen per m² straleroppervlak. Aanvullend onderzoek is nodig om te bepalen in welke mate de verminderde benutting van de straling en het geringe verbrandingsluchtdebiet verantwoordelijk zijn voor de achterblijvende prestaties van de TENNON.

Naarmate de plantmassa dichter is zal de koelende en remmende werking van de lucht in de grenslaag bij het oppervlak sterker worden, zodat de temperaturen onder in de plantmassa aanzienlijk lager zullen zijn dan de in tabel 2.3 gegeven gemiddelde temperaturen. De sterk geforceerde luchtstroom van de HOAF met vlammen dicht bij het grondoppervlak (figuur 6.2) lijkt echter goed door te kunnen dringen in dichte plantmassa's. Bij de hoogste snelheid (7 km/u) in gras was de doordringing echter beperkt, zodat alleen de grasbladtoppen waren beschadigd (figuur 4.3 en 4.5 rechtsboven). Zoals water zich "harder" gedraagt naarmate een speedboot sneller vaart, zo is het bij hogere snelheden moeilijker om in de isolerende luchtlaag tussen planten door te dringen. Het is ook mogelijk dat het direct contact tussen vlam en plant verantwoordelijk is voor de effectiviteit van de HOAF.

Figuur 6.2 De vlammen en de geforceerde luchtstroom van de HOAF dringen door tot op het grondoppervlak.



Hoewel het de bedoeling was dat de TENNON en de HOAF ongeveer hetzelfde vermogen zouden hebben, bleek dat de HOAF ongeveer het dubbele vermogen had van de TENNON. Dit heeft belangrijke gevolgen voor de haalbare snelheid, maar de conclusies t.a.v. efficiëntie (gasverbruik per ha voor gelijkwaardige doding) zou bij overeenstemmende vermogens niet veranderen. Immers, bij verhoging van het gasverbruik van dezelfde brander neemt het voor doding benodigde gasverbruik per ha doorgaans iets toe (Ascard, 1995; Bertram 1996). Daarom zou een HOAF bij lager vermogen zelfs nog iets efficiënter zijn.

6.2 Mogelijke verbeteringen

Vergroting van het vermogen en het creëren van een sterke heteluchtstroom die waterdamp afvoert en kan doordringen in dichte bladmassa's zijn de twee belangrijkste punten voor verbetering van de machineprestaties. Hoewel het straleroppervlak van 0.541 m² een vermogen van 189 kW kan leveren (bij maximale stralingsproductie), kon het huidige prototype dit vermogen niet realiseren. De opwarming van de gastoevoerleidingen lijkt hiervoor de belangrijkste oorzaak te zijn. Het dichten van de kieren in de isolatie rondom branderaansluitingen en gastoevoerleidingen die niet verbonden zijn met het verhitte hoofdframe, zijn constructieve aandachtspunten. Ook de afscherming van hete onderdelen (veiligheid omstanders) is een aandachtspunt, omdat nu de hele machine heet wordt.

De heteluchtstroom zou kunnen worden opgevoerd door de bestaande stralers bij een hoger vermogen te laten werken, of door een geforceerde stootbrander of ventilator erbij te bouwen. Als het stralervermogen wordt opgevoerd tot 500 kW/m² bij een luchtgetal van 1.05, komt het vermogen in de

buurt van het vermogen van de HOAF met de huidige instelling: 270 kW. Als we uitgaan van een stralingsefficiëntie van 39% (iets lager dan 42% gemeten door Gaz de France) wordt hierbij de stralertemperatuur ca. 1150°C en de verbrandingsluchttemperatuur ca. 1670°C, bij een debiet van 30.8 m³/min. De verticale uittreesnelheid van die verbrandingslucht uit de stralers blijft echter beperkt tot 3.4 km/u. Dit is waarschijnlijk onvoldoende voor een goede doordringing van dichte plantmassa's. Het is echter moeilijk te voorspellen of de vlammen aan het stralerooppervlak de effectiviteit kunnen verhogen en in hoeverre het probleem met de vrijkomende waterdamp wordt opgelost.

Door de kwetsbaarheid van de hete stralingsschermen moet de straler bij groot, stevig onkruid verder boven het oppervlak worden geplaatst. Omdat hierdoor de stralingsintensiteit aan het oppervlak daalt, gaat dit ten koste van de efficiëntie. Door het plaatsen van beschermende onderdelen onder de stralingsschermen zou een deel van de straling niet op het onkruid maar op deze beschermers terecht komen. De beschermers zouden ook een positief effect kunnen hebben doordat ze de opgevangen energie weer uitstralen of hitte door direct contact overbrengen op groot onkruid.

6.3 Perspectieven op verhardingen

In de inleiding (hoofdstuk 1.1) zijn al een aantal kenmerken genoemd die van belang zijn bij de verbetering van onkruidbranders voor verhardingen. Wat betreft compactheid en gewicht, energie-efficiëntie en vermogen per m² machineoppervlak biedt de TENNON in zijn huidige vorm geen voordelen boven de bestaande HOAF brander. Qua geluidsniveau en de beperkte hete luchtstroom naar de omgeving biedt de TENNON duidelijk voordelen, mits verhitting van de machine als geheel kan worden verminderd. Ook de regelbaarheid van het vermogen is een praktisch voordeel, maar dit zou in principe ook op de HOAF kunnen worden toegepast.

Wellicht bestaat er perspectief voor een compacte, lichte brander-unit met hoog vermogen, die snel en automatisch om obstakels kan worden gestuurd (bijvoorbeeld een unit (l x b x h = 30 x 50 x 25) op zwenkwielen aan een uitschuifbare zwenkarm). Het hoge en regelbare vermogen zou kunnen worden bereikt door een combinatie van straler en stootbrander.

Het "onkruid" in de experimenten was groter en dichter dan doorgaans op verhardingen het geval is. Omdat de HOAF zowel in dicht gras als in het relatief open dicotyle gewas gele mosterd beter presteerde dan de TENNON straler, verwachten we dat dezelfde tendens zich ook in andere zwaar begroeide situaties zal voordoen. Echter, bij kleiner onkruid zouden het verschil tussen HOAF en TENNON iets kleiner kunnen zijn door de verminderde onderlinge beschaduwing van onkruidbladeren en door de verminderde hoeveelheid vrijkomende waterdamp.

6.4 Perspectieven in de landbouw

Niet-chemische loofdoding (vooral in aardappelen) en onkruidbestrijding in de gewasrijen voor gewasopkomst lijken op dit moment de belangrijkste toepassingen voor branders in de landbouw te zijn. Voor beide toepassingen dienen 10-20 cm brede stroken te worden verhit en speelt wendbaarheid een ondergeschikte rol. Rijsnelheid, gasverbruik en machinegewicht lijken van groter belang te zijn in verband met de lage kostprijs van alternatieven.

Verticaal gestelde IR stralers aan weerszijden van de top van aardappelruggen zouden geklapt loof van weerszijden kunnen verhitten, terwijl de niet opgevangen straling de IR straler aan de overkant van de rugtop verhit. Als tevens de gastoevoer wordt geregeld door de stralertemperatuur kan de energie mogelijk beter worden benut. Als dit principe, eventueel ondersteund door een stootbrander wordt toegepast in lange tunnels, zou men tevens snel kunnen rijden.

Dergelijke lange smalle tunnels zijn ook voor onkruidbestrijding in de rij toepasbaar, maar de stralers moeten daarbij naar beneden gericht zijn om klein onkruid goed te kunnen raken. We hebben de indruk dat de IR straler de grond sterker verwarmt dan de HOAF. Dit zou in een opkomend gewas een nadeel kunnen zijn.

7 Conclusies

Het prototype TENNON 20-200 IR straler was in alle experimenten minder efficiënt dan de HOAF Weedstar 100 bij een gelijkwaardig bestrijdingsresultaat (tabel 7.1). Omdat bovendien het vermogen van de TENNON lager was, bleef de haalbare rijsnelheid ver achter bij die van de HOAF brander. Qua geluidsniveau was de TENNON duidelijk in het voordeel, maar het geluidsniveau van de HOAF is niet onaanvaardbaar hoog. Bij deze resultaten dient te worden opgemerkt dat het prototype TENNON straler een lager vermogen heeft (ca. 150kW) dan de HOAF (ca. 300 kW), hetgeen grote gevolgen heeft voor de haalbare rijsnelheid.

Tabel 7.1 Samenvatting van de resultaten in drie gewassen

	gasverbruik (kg/ha)		rijsnelheid (km/u)	
	HOAF	TENNON hoog	HOAF	TENNON hoog
80% doding mosterd	32	85	6.5	1.2
doding gras in twee werkgangen	150	190	2.7	1.1
doding geklapt aardappelloop ^{a)}	280	450	0.8	0.2

a) mate van doding: 1 nieuw uitgelopen stengel per 4 meter rug

De efficiëntie van de TENNON bleef achter bij de verwachting. De belangrijkste oorzaak daarvoor is waarschijnlijk de gebrekkige afvoer van waterdamp onder de straler. Waterdamp die vrijkomt bij de verbranding en uit planten absorbeert een deel van de infrarode straling. Een tweede oorzaak, die vooral bij gele mosterd en in aardappelloop meespeelt, is een slechtere benutting van de IR-straling op gedeeltelijk begroeide oppervlakken, waarbij de niet door planten opgevangen straling verloren gaat. Een derde oorzaak is de afname van de stralingsintensiteit bij grotere afstanden tussen plant en straler (bij aardappelloop) en de lagere stralingsintensiteit onder de rand van hetstralend oppervlak (ongelijkmatig bestrijdingseffect).

Het huidige prototype zou op verscheidene punten kunnen worden verbeterd (veiligheid, geïsoleerde gastoevoerleidingen, kwetsbaarheid stralers), waarbij tevens het vermogen per m² straleroppervlak zou kunnen worden opgevoerd. De belangrijkste twee technische opgaven zijn de verbetering van de waterdampafvoer en de hittebestendigheid van de constructie. Omdat de belemmerende rol van waterdamp en de relatieve bijdrage van hete lucht, infrarode straling en direct vlamcontact in de energieoverdracht naar planten niet kon worden gekwantificeerd, is het niet mogelijk om te voorspellen of een verbeterd prototype TENNON straler de efficiëntie van stootbranders met geforceerde luchttoevoer (HOAF) kan overtreffen. Het nu voorliggende onderzoek maakt het echter mogelijk om het effect van verbeteringen in minder omvangrijke proeven te toetsen.

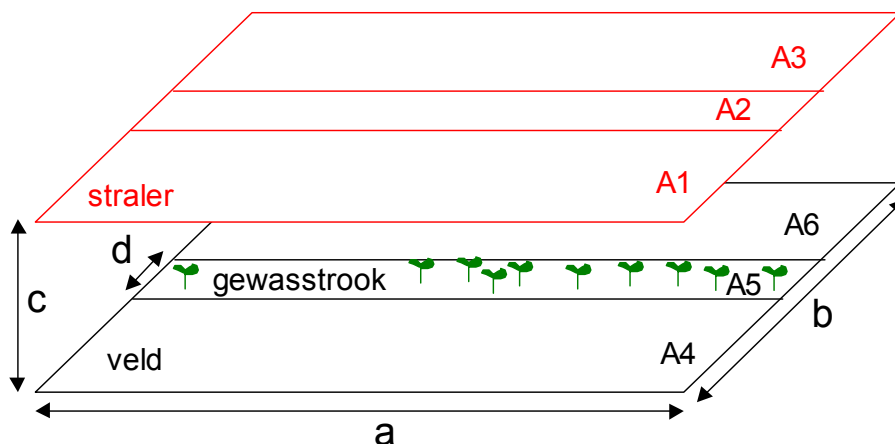
Benutting van infrarode straling biedt mogelijk perspectieven voor de thermische loofdoding in aardappelen en voor thermische onkruidbestrijding voor opkomst van gewassen. Op verhardingen ligt de winst van infrarode straling mogelijk in een combinatie van straling met hete lucht (stootbrander) in een compacte unit met een regelbaar hoog vermogen aan een automatisch bestuurbare zwenkarm.

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., 1997. Flame weeding: effects of fuel pressure and tandem burners. *Weed Research* 37: 1, 77-86.
- 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 Abflamntechnik 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.
- Medema, W.J., 1997. Borstelen met branden wint terrein. *Tuin en Park Techniek* 4: 2, 18-21.
- 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.
- 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.
- Sparrow, E.M.; Cess, R.D., 1978. *Radiation heat transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 366 pp.
- Wolfe, W.L.; Zissis, G.J., 1985. *The infrared handbook*. Revised edition. Environmental Research Institute of Michigan.

Bijlage A Berekening van de fractie stralingsenergie die in een gewasstrook terecht komt

Infraroodstralers hebben een rechthoekig stralend oppervlak ($a \times b$) dat een bepaalde afstand (c) boven de grond hangt (figuur A1). Op basis van de hoekfactorcatalogus en theorie in Sparrow en Cess (1978) wordt hieronder de formule afgeleid waarmee de fractie straling die in de gewasstrook met breedte d terecht komt kan worden berekend.



Sparrow en Cess (1978) geven een hoekfactor voor twee parallelle vlakken A123 en A456 (afmetingen $a \times b$, oppervlakte $A1+A2+A3$) en onderlinge afstand c . $F_{A123-A456}$ is de fractie straling van A123 die wordt opgevangen door A456.

$$F_{A123-A456} = -\ln \sqrt{\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}} + Y \sqrt{1+X^2} \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} +$$

$$X \sqrt{1+Y^2} \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} - Y \arctan Y - X \arctan X - \frac{\pi XY}{2}$$

met $X = a / c$ en $Y = b / c$

Als we deze formule willen gebruiken voor het berekenen van de fractie van de energie die van vlak A123 naar A5 straalt, moet de energiestroom tussen vlakken A1 t/m A6 zodanig worden beschreven dat $F_{A123-A5}$ kan worden afgeleid:

$$A123 \times F_{A123-A5} = A123 \times F_{A123-A456}^* - A1 \times F_{A1-A6} - A2 \times F_{A2-A6} - A3 \times F_{A3-A6}^*$$

$$- A1 \times F_{A1-A4}^* - A2 \times F_{A2-A4} - A3 \times F_{A3-A4}$$

De met een * gemerkte hoekfactoren kunnen direct met formule A1 worden berekend, maar de andere kunnen worden afgeleid met de onderstaande relaties.

$$\begin{aligned}
 A1 \times F_{A1-A5} &= A2 \times F_{A2-A4} F_{A1-A5} = F_{A3-A5} \\
 A2 \times F_{A2-A6} &= A3 \times F_{A3-A5} F_{A1-A4}^* = F_{A3-A6}^* \\
 F_{A1-A6} &= F_{A3-A4} \quad F_{A2-A4} = F_{A2-A6} \\
 A1 &= A3 = A4 = A6
 \end{aligned}$$

Door deze relaties te substitueren in formule A2 krijgt men:

$$A123 \times F_{A123-A5} = A123 \times F_{A123-A456}^* - 2 A1 \times F_{A1-A6} - 2 A1 \times F_{A3-A6}^* - 2 A2 \times F_{A2-A6}$$

Hierin zijn F_{A1-A6} en F_{A2-A6} nog onbekende hoekfactoren, die volgens Sparrow en Cess (1978) als volgt kunnen worden afgeleid:

$$\begin{aligned}
 A2 \times F_{A2-A6} &= A23 \times F_{A23-A56}^* - A3 \times F_{A3-A6}^* - A3 \times F_{A3-A5} - A2 \times F_{A2-A5}^* \\
 A1 \times F_{A1-A6} &= A123 \times F_{A123-A456}^* - A23 \times F_{A23-A56}^* - A23 \times F_{A23-A4} - A1 \times F_{A1-A4}^* - A1 \times F_{A1-A5}
 \end{aligned}$$

Door omschrijven en substitutie van de relaties uit A3 krijgt men tenslotte:

$$F_{A123-A5} = \frac{A12 \times F_{A12-A45}^* - A1 \times F_{A1-A4}^*}{A} I23$$

Door de werkelijke afmetingen van A1, A12 en A123 in te vullen en $F_{A12-A45}$ en F_{A1-A4} te berekenen met formule A1 kan men de fractie uitgestraalde energie berekenen die van A123 op A5 terecht komt. De gemiddelde relatieve stralingsintensiteit (t.o.v. A123) bedraagt:

$$relatieve\ stralingsintensiteit = A5 \times (A12 \times F_{A12-A45}^* - A1 \times F_{A1-A4}^*)$$