

Onkruidbestrijding op verhardingen met infrarode straling

Deel 1. Verkenning

D.A.G. Kurstjens

IMAG-DLO Nota

In het kader van LNV programma onkruidbeheersing (266), project onkruidbeheersing stedelijke gebieden (51015).

Inhoud

Samenvatting	2
1 Inleiding	3
1.1 Problematiek en oplossingsrichtingen	3
1.2 Bestaande bestrijdingstechnieken voor verhardingen	5
1.3 Doelstelling en werkwijze	7
2 Bestaande onkruidbranders	8
2.1 Typen onkruidbranders en hun efficiëntie	8
2.2 Eigenschappen van energie overdracht door straling en convectie	9
3 Stralingsenergie overdracht op planten	11
3.1 Factoren die energieoverdracht door straling beïnvloeden	11
3.2 Absorptie van straling door plantaardig materiaal	12
3.3 Het voor planten dodelijke stralingsniveau	15
4 Overdracht van stralingsenergie door gasgestookte en elektrische stralers	19
4.1 Emissiespectrum	19
4.2 Elektrische stralers	20
4.3 Gasgestookte stralers	21
4.4 Overdrachtsefficiëntie in relatie tot stralertemperatuur	22
4.5 Focusering van straling op planten en kleine doelgebieden	25
4.6 Stralerpositionering	26
5 Lasers	29
5.1 Werkingsprincipe en typen	29
5.2 Oriënterende experimenten	33
6 Conclusies en aanbevelingen	35
6.1 Algemeen	35
6.2 Verbetering van branders	35
6.3 Energie overdracht op planten met infrarode straling	37
6.4 Lasers	38
Referenties	39
Bijlage A Berekening van de fractie stralingsenergie die in een gewasstrook terechtkomt, voor een gasgestookte IR-brander	44

Samenvatting

Dit rapport verkent mogelijkheden voor het verbeteren van machines voor thermische onkruidbestrijding op verhardingen. Hoewel er in de laatste jaren betere machines op de markt zijn gekomen, zijn de lage capaciteit en (mede daardoor) de relatief hoge kostprijs per m² belangrijke nadelen ten opzichte van chemische bestrijding. In combinatie met CO₂ uitstoot (gebruik fossiele brandstoffen) en de beperkte effectiviteit, belemmeren deze nadelen een bredere toepassing.

Het toepassen van onkruidherkenning en automatische besturing zou de capaciteit van machines kunnen verhogen, maar het is niet duidelijk of deze capaciteitsverhoging en brandstofbesparing opweegt tegen de kosten van geavanceerde technologie. Een efficiëntere energie-opwekking en energieoverdracht op planten in combinatie met een richtbare, intensievere energiestroom is een tweede richting voor verbetering. Dit rapport verkent de mogelijkheden van energieoverdracht met infrarode straling van elektrische en gasgestookte stralers en lasers.

Planten absorberen infrarode straling met golflengten boven 2.4 µm het meest efficiënt en zijn zo goed als transparant voor golflengten tussen 0.75 en 1.3 µm. Bij toenemende stralertemperatuur daalt de absorptie-efficiëntie, maar levert de straler een hogere energiestroomdichtheid. Efficiëntie en hoge energiestroomdichtheid kunnen worden gecombineerd door goed absorbeerbare straling van een efficiënte straler te focuseren op een deel van de plant. Focussing en mogelijkheden voor een betere benutting van infrarode straling in conventionele branders verdienen nader onderzoek.

Bestaande gegevens over de dodelijke stralingsdosis lopen sterk uiteen en goed opgezette experimenten waarbij de rol van convectie en straling kan worden onderscheiden zijn zeer schaars. Nader onderzoek naar de dodelijke stralingsdosis in relatie tot onkruidsoort en -grootte, stralingsintensiteit en gedeeltelijke bestraling is wenselijk.

Uit een grove verkenning bleek dat CO₂ lasers onkruiden energetisch efficiënt zouden kunnen afsnijden als de laserstraal een hoge benuttingsgraad heeft. Hiervoor zijn sensoren en nauwkeurige positioneringstechnieken nodig. Omdat de golflengte van Nd:YAG lasers nauwelijks wordt geabsorbeerd zijn deze niet geschikt voor het afsnijden van onkruid.

1 Inleiding

1.1 Problematiek en oplossingsrichtingen

Het door burgers gewenste straatbeeld en de eigenschappen van bestaande vormen van verharding maken een bepaalde regelmaat en mate van onkruidverwijdering noodzakelijk. Anderzijds stellen burgers en bestrating voorwaarden aan de methoden voor onkruidverwijdering. De beheerder van verhardingen moet zo goed mogelijk tegemoet komen aan de wensen van burgers, maar heeft daartoe beperkte middelen (geld, personeel en tijd) en technische mogelijkheden.

Deze voorwaarden stellen hoge eisen aan onkruidbestrijdingstechnieken. Omdat de nu beschikbare niet-chemische technieken slecht aan de eisen voldoen, maken veel beheerders nog in grote mate gebruik van herbiciden, terwijl dit maatschappelijk ongewenst is. Hoewel veel gemeenten onder de publieke druk borstels en branders gingen toepassen, lijkt het gebruik van chemische middelen weer toe te nemen.

Zowel het gebruik van herbiciden op zichzelf als de pieken in de afvoer naar het oppervlaktewater en rioolwaterzuiveringsinstallaties stuit op bezwaren. De reden voor het gebruik van herbiciden is vooral van financiële aard, want de relatief lage capaciteit, de beperkte werkingsduur en het relatief hoge brandstofverbruik maken niet-chemische opties onaantrekkelijk (zie Sluijsmans en Hoksbergen 1992, Augustin 1990). Bovendien beschadigen borstels de bestrating hetgeen vooral op historische plaatsen ontoelaatbaar is. De machines zijn vaak luidruchtig en borstels zijn niet voor alle typen bestrating geschikt. Het manoeuvreren rond obstakels verlaagt de capaciteit en vergt veel behendigheid. Bij branders bestaat brandgevaar bij verdroogd onkruid, blad of maaisel (Augustin 1990).

Er zijn een aantal richtingen denkbaar waarin oplossingen voor de hierboven beschreven problematiek kunnen worden gezocht:

- Beïnvloeden van het gewenste straatbeeld (“onkruid is natuurlijk mooi”, aandacht afleiden door combinatie met andere objecten of esthetisch acceptabele begroeiingen) en de publieke waardering van bestrijdingsmethoden (spuitfrequentie verminderen, onzichtbaar toedienen door onherkenbare herbicidekorrels, 's nachts spuiten of spuiten gelijktijdig met vegen).
- Het optimaal afstemmen van de (evt. soort- en plaatsspecifieke) mate en frequentie van bestrijding op het (mogelijk tijd- en omgevingsafhankelijke) acceptabele straatbeeld en groeisnelheid van het onkruid. Hiervoor is inzicht in de achtergrond van voorkeuren (aanwezigheid van bepaalde onkruiden of van bestrijders zelf), kennis van onkruidontwikkeling in de tijd en informatie over bestrijdingskosten in relatie tot intensiteit en duur van het effect belangrijk.

- Het ontwikkelen van effectieve herbiciden met een breed werkingspectrum, die zich hechten aan tegels of snel worden afgebroken in onschadelijke stoffen.
- Verminderen van herbicide depositie op tegels (verbeterde spuittechnieken, plaatsspecifiek werken (plekken of alleen in voegen), aanpassing doseringen)
- Het aanpassen van bestrating en inrichting, door het volgende na te streven:
 - Verminderen van de vestigingskansen voor onkruiden en zaden (breedte, vorm en relatief oppervlak van de voegen, afdichtingen).
 - Verbeteren van de bestrijdbaarheid van het onkruid en de haalbare capaciteit (positie van hindernissen, vlakheid, richting van voegen, tegelverband, tegelgrootte, herkenbaarheid van preferente groeiplaatsen voor automatische plaatsspecifieke bestrijding).
 - Verminderen van de afspoeling van herbiciden (hechting herbiciden aan tegeloppervlak, waterdoorlatendheid van voegen en het materiaal zelf, preferente waterafvoerrichting van een verhard gebied).
- Niet-chemische bestrijdingstechnieken zodanig verbeteren dat ze voor beheerders een aantrekkelijker alternatief voor herbiciden vormen. Hierbij zijn drie sporen denkbaar:
 - Mycoherbiciden en andere biologische technieken ontwikkelen met een lange werkingsduur, die ook in het microklimaat van bestratingen (relatief droog en warm) goed aanslaan en hun werking behouden.
 - Bestaande machines optimaliseren, door het verlagen van de kosten per bewerking en / of het verlengen van de perioden tussen bestrijdingen (door hogere effectiviteit).
 - Nieuwe mechanische en fysische bestrijdingstechnologieën ontwikkelen. Industriële snij-technieken met water of laser, of technieken voor zeer lokale verhitting bieden mogelijk voordelen t.o.v. borstels en conventionele branders.

De mogelijkheden voor verhoging van de effectiviteit van borstels en branders lijken zeer beperkt, omdat in principe alleen bovengrondse plantedelen kunnen worden bestreden. Als men desondanks onkruid niet-chemisch wil bestrijden, met het gewenste straatbeeld en de aanwezige bestrating als een gegeven voorwaarde, dan is het minimaliseren van de jaarlijkse bestrijdingskosten en de ongunstige neveneffecten de belangrijkste doelstelling. In dit kader zijn er twee onderwerpen die in onderlinge samenhang aandacht verdienen:

- a) Het vinden van optimale combinaties van de bestrijdingseffectiviteit en het aantal werkgangen, afgestemd op de plek-specifieke onkruidbezetting en de mogelijkheden van de beschikbare bestrijdingstechnieken.

- b) Verbetering van machines: vinden van optimale combinaties van inzetbaarheid, aanschafprijs en capaciteit, afgestemd op het gebruik binnen een bestrijdingssysteem van een gemeente en veelzijdige onkruidsituaties.



Figuur 1.1 Borstelmachine (foto: Drost machines B.V.)

1.2 Bestaande mechanische en thermische bestrijdingstechnieken voor verhardingen

Momenteel worden vooral borstelmachines (figuur 1.1) en branders (figuur 1.2) ingezet. Deze beschadigen of verwijderen alleen de boven het oppervlak uitstekende plantedelen. Omdat plantedelen in voegen onbereikbaar zijn blijven wortelstelsels en laag gelegen groeipunten ongedeerd. Bovendien ontsnappen onkruiden, of blijven bovengrondse delen deels onbeschadigd. Hierdoor moet de bestrijding vaker worden herhaald. Het is niet duidelijk in hoeverre verhoging van de effectiviteit het aantal bewerkingen per seizoen kan terugdringen. Het is ook onduidelijk of een lagere effectiviteit en een hogere werksnelheid mogelijk is zonder vergroting van het aantal noodzakelijke behandelingen. Omdat de mogelijkheden voor verhoging van de effectiviteit zeer beperkt lijken, is kostenbesparing het belangrijkste oogmerk bij de optimalisatie van machines.

De kostprijs per m² behandeld oppervlak is afhankelijk van het brandstofverbruik en de capaciteit in relatie tot de aanschafprijs en levensduur van de machine. Augustin (1990) becijferde dat

onkruidbestrijding door vijf maal afbranden tussen 23 en 45 cent/m² per jaar kost, waarvan 5.5 - 6.5 cent/m² brandstofkosten. Hoksbergen en Jager (1985) berekenden dat een enkele behandeling 7 – 10 cent/m² kost, waarvan 1.2 – 1.6 cent/m² brandstofkosten. Bij toepassing op bochtige wegen kon een 90 cm brede infraroodstraler 744 m²/uur behandelen (Augustin 1990). In een omgeving zonder hindernissen haalde deze machine een capaciteit van 1400 m²/uur bij een rijsnelheid van ca. 2.5 km/uur. De capaciteit en kosten van de machine hebben een veel grotere invloed op de kostprijs van bestrijding dan de brandstofkosten (Klooster 1983, Hege 1989). Hoewel brandstofverbruik uit kosten oogpunt van ondergeschikt belang is, zijn de CO₂ uitstoot en het gebruik van fossiele brandstoffen maatschappelijk ongewenst.

Borstelen en vegen is duurder (27-35 cent/m² per behandeling) maar is effectiever in zwaar begroeide situaties met grond op de verharding (Sluijsmans en Hoksbergen 1992). Op stoepen en klinkerwegen in Arnhem waren 2 - 3 behandelingen per seizoen voldoende, maar de totale kosten zijn afhankelijk van het bestrijdingsregime en de onkruidbegroeiing.

In de afgelopen twee jaar zijn ook onkruidbestrijdingsmachines op de markt gekomen, die onkruid verhitten met stoom of heet water. Hoewel dit onderwerp sterk in de belangstelling staat, zijn bij de auteur geen publikaties bekend die een degelijke vergelijking van de energie-efficiëntie, capaciteit en kosten toelaten.



Figuur 1.2 Onkruidbrander (foto: HOAF apparatenfabriek B.V.)

1.3 Doelstelling en werkwijze

Uit de eerste paragraaf blijkt dat er verschillende mogelijkheden zijn om de knelpunten rond de niet-chemische onkruidbestrijding op verhardingen op te lossen. Dit rapport verkent mogelijkheden voor het verbeteren van machines voor thermische onkruidbestrijding.

De kostprijs van onkruidbranden op verhardingen wordt vooral bepaald door de capaciteit en in mindere mate door het brandstofverbruik (ca. 15 - 20% van de bestrijdingskosten). Daarom zijn vergroting van het vermogen per meter werkbreedte, verbetering van de wendbaarheid, aanpassing van de rijnsnelheid in relatie tot de onkruidbezetting en automatische besturing rondom obstakels belangrijke doelstellingen bij verdere optimalisatie van het machine-ontwerp. Hoewel hoofdstuk 6 aanbevelingen voor het verbeteren van machine-ontwerpen bevat, concentreert dit rapport zich op mogelijkheden voor verbetering van de werkingsprincipes die aan onkruidbranders ten grondslag liggen.

Door de ruimtelijke variabiliteit van de onkruidbezetting binnen het branderbereik (werkbreedte, lengte) is de onkruidplek of -plant met de langste benodigde verblijftijd bepalend voor de capaciteit. Daarom zijn voor een grote capaciteit werkingsprincipes nodig met een efficiëntere energieoverdracht en een hoge energiestroomdichtheid. Richtbaarheid van de energiestroom op een doelgebied en hergebruik van de energie die niet door planten is opgenomen, verhoogt bovendien de efficiëntie. Fundamenteel onderzoek naar effectievere warmte-overdracht is vooral gericht op convectieve warmte-overdracht, terwijl de mogelijkheden van electromagnetische straling onderbelicht zijn gebleven.

Omdat electromagnetische straling (in de rest van dit rapport "straling" genoemd) een aantal aantrekkelijke eigenschappen heeft voor het snel verhitten van planten verkent dit rapport de haalbare overdrachtsefficiëntie en energiestroomdichtheid, en mogelijkheden voor het richten van de energiestroom en beperking van verliezen. Het is daarbij de vraag welke straling (golflengte) het meest geschikt is voor het doden van planten (absorptie, doordringing) en met welke intensiteit en efficiëntie deze straling kan worden opgewekt met bestaande gasgestookte stralers, elektrische stralers en lasers. Verder wordt onderzocht in hoeverre focussing van straling de voor doding benodigde energie en de verliezen zou kunnen verlagen en de capaciteit kan verhogen. Dit rapport verkent ook de praktische toepasbaarheid van dit principe in elektrische en gasgestookte stralers en de eisen die daarbij aan de besturing worden gesteld.

Het aanvankelijke doel van deze verkennende studie was om aan te geven of onkruid sneller en efficiënter kan worden gedood door het beter benutten van infrarode straling in bestaande onkruidbranders, of het toepassen van lasers of andere typen gasgestookte of elektrische stralers. Vanwege gebrek aan betrouwbare gegevens was dit doel niet bereikbaar en is afgezien van het modelmatig vergelijken van verschillende typen stralers voor onkruidbestrijding.

2 Bestaande onkruidbranders

2.1 Typen onkruidbranders en hun efficiëntie

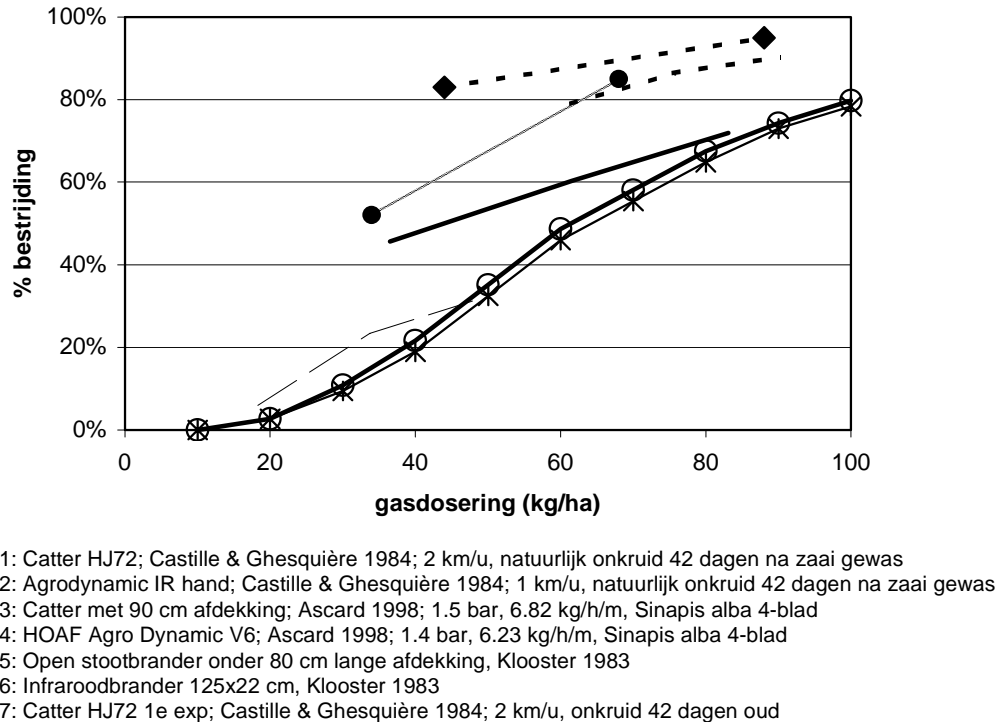
Kurstjens (1998) geeft een overzicht van thermische onkruidbestrijding met open en afgedekte branders, infrarode straling, hete lucht en stoom, heet water, lasers, en elektrocutie. Op bestratingen, tegels, schelpenpaden en andere verharde oppervlakken worden vooral LPG-, propaan- of butaanbranders gebruikt, die in twee typen te onderscheiden zijn:

1. Afgedekte stootbrander, waarbij de hete gasstroom van een grote open vlam onder een geïsoleerde metalen kap wordt geleid. De kap zorgt ervoor dat de gasstroom lang in contact blijft met planten bij het oppervlak, hetgeen de convectieve warmteoverdracht bevordert (Ascard 1995a, Bertram 1996). Bovendien straalt de hete kap langgolvlige infrarode straling uit. Sommige kappen (b.v. HOAF Infraplus) zijn gericht ontworpen voor het produceren van straling. De vlam is zodanig gericht dat de turbulente gasstroom via convectie warmte op planten overdraagt, terwijl de vlam tevens de kap verhit (M. Looman, HOAF, pers. med. 1998).
2. Infraroodbrander (figuur 4.3), waarbij een gas - lucht mengsel door een poreuze plaat wordt gevoerd. Het gasmengsel heeft een lage stroomsnelheid en ontbrandt aan het oppervlak van de poreuze plaat. De vlammen en het verhitte plaatoppervlak stralen vervolgens warmte uit. Ook bij branders die zijn ontworpen voor het produceren van infrarode straling vindt convectieve warmteoverdracht plaats.

Castille en Ghesquière (1984) vergeleken een handbediende Agrodynamic IR straler en een Catter HJ72 afgedekte brander met rijssnelheden van resp. 1 en 2 km/u, drie gasdrukken en relatief oude onkruiden (42 dagen na zaai van het gewas). Zij concludeerden dat de IR brander minder efficiënt was dan de open brander. De basis voor deze conclusie is zwak omdat het vermogen van de branders sterk verschilt (gasdebiet Agrodynamic IR en Catter HJ72 resp. 0.75 en 3.75 kg/u bij 2 bar). Uit figuur 2.1 blijkt dat het verschil in effectiviteit vooral op de gasdosis terug te voeren is.

Ascard (1998) vergeleek een Catter brander (6.82 kg/u per meter werkbreedte bij 1.5 bar, 90 cm lange afdekking) met een HOAF Agrodynamic V6 infraroodstraler (6.23 kg/u per meter werkbreedte bij 1.4 bar, 100 cm lange straler) met 6 snelheden van 0.5 tot 12 km/u. Gele Mosterd (*Sinapis alba* L.) werd behandeld in 3 stadia (kiemplant, 0-2 blad, 4 blad) bij droge weersomstandigheden en temperaturen op 1 en 3.5 cm boven het grondoppervlak werden gemeten met thermokoppels. Bij het 4 blad stadium kwamen de dosis - respons curven overeen (figuur 2.1).

Beide typen branders combineren het effect van straling en convectie. Omdat deze bijdragen aan de totale energie overdracht niet apart zijn gemeten, kan uit proeven met dergelijke machines niet het effect van infrarode straling op planten worden achterhaald. Ascard (1995a, 1998) onderkent dat een vergelijking complexer is dan op het eerste gezicht kan worden verwacht, omdat niet alle soorten



Figuur 2.1 De effectiviteit van afgedekte open branders (vette lijnen) en infraroodstralers (dunne lijnen) in relatie tot hun gasgebruik.

identiek reageren. Bovendien hebben de resultaten betrekking op de specifieke prototypes die zijn gebruikt bij veldexperimenten (Kurstjens 1998). Tenslotte zijn er maar weinig goed opgezette dosis-respons experimenten uitgevoerd met verschillende typen branders onder goed gedefinieerde omstandigheden.

Ondanks deze methodologische problemen menen Ascard (1995a), Castille en Ghesquière (1985), Geier (1987), Klooster (1983), Nyström en Svensson (1988) en Hege (1989) dat infraroodstralers inferieur zijn ten opzichte van overkapte branders wat betreft effectiviteit, energie-efficiëntie, capaciteit en kosten. De dosis-respons curven in figuur 2.1 geven echter geen duidelijke aanleiding tot een dergelijke conclusie wat de energie-efficiëntie betreft.

2.2 Eigenschappen van energie overdracht door straling en convectie

Energie overdracht op planten door straling is een fundamenteel ander proces dan convectieve warmte-overdracht. Daardoor hebben deze processen beide specifieke mogelijkheden en beperkingen (tabel 2.1). In recent onderzoek is het convectieve warmteoverdrachtproces gemodelleerd (Bertram 1996) en werd gezocht naar mogelijkheden om de energiestroomdichtheid te verhogen met stoom (Storeheier 1996) en verkleining van het luchtoverschot bij verbranding (Bertram

1996). Hoewel recirculatie van hete lucht de warmteverliezen beperkt is een lange verblijfsduur nodig voor efficiënte convectieve warmte-overdracht.

Voor de indringing van straling in de plant en de beperkte warmteverliezen aan de lucht zijn aantrekkelijke eigenschappen voor het bestrijden van planten met verborgen groeipunten of dieper liggende delende weefsels. Verder zijn er in principe mogelijkheden om de energiestroomdichtheid zeer hoog op te voeren (temperatuur, focusering). Omdat straling kan worden gericht op bepaalde doelgebieden, is gedeeltelijke verhitting van onkruidplanten en het overslaan van onbegroeide plekken in principe mogelijk. Uitgestraalde energie die niet door planten is geabsorbeerd kan echter niet opnieuw worden gebruikt.

Tabel 2.1 Kenmerken van energieoverdracht door straling en convectie

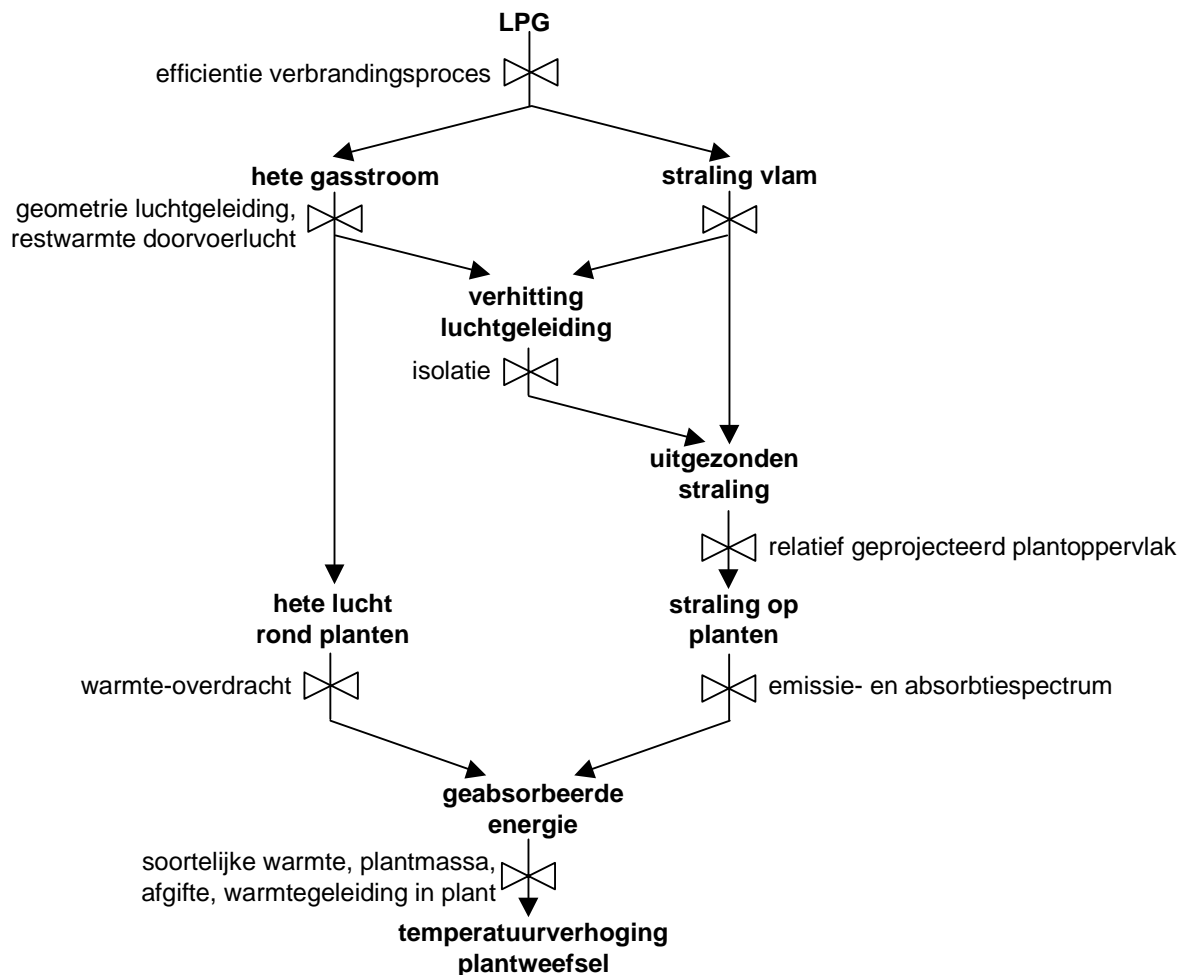
eigenschap	convectie	straling
schaduwwerking	nee	ja
indringing in materiaal	nee	ja
grenslaag bij grondoppervlak	ja	nee
deelname medium in energie overdracht	ja	nee
richtbaarheid van energiestroom	beperkt	ja
Niet opgenomen energie herbruikbaar	ja	nee
intensiteit energie overdracht bepaald door...	T_{lucht}	T_{straler}
	blootstellingstijd	blootstellingstijd
	dampdruk	focusering
		emissie- en absorptiespectrum

3 Stralingsenergie overdracht op planten

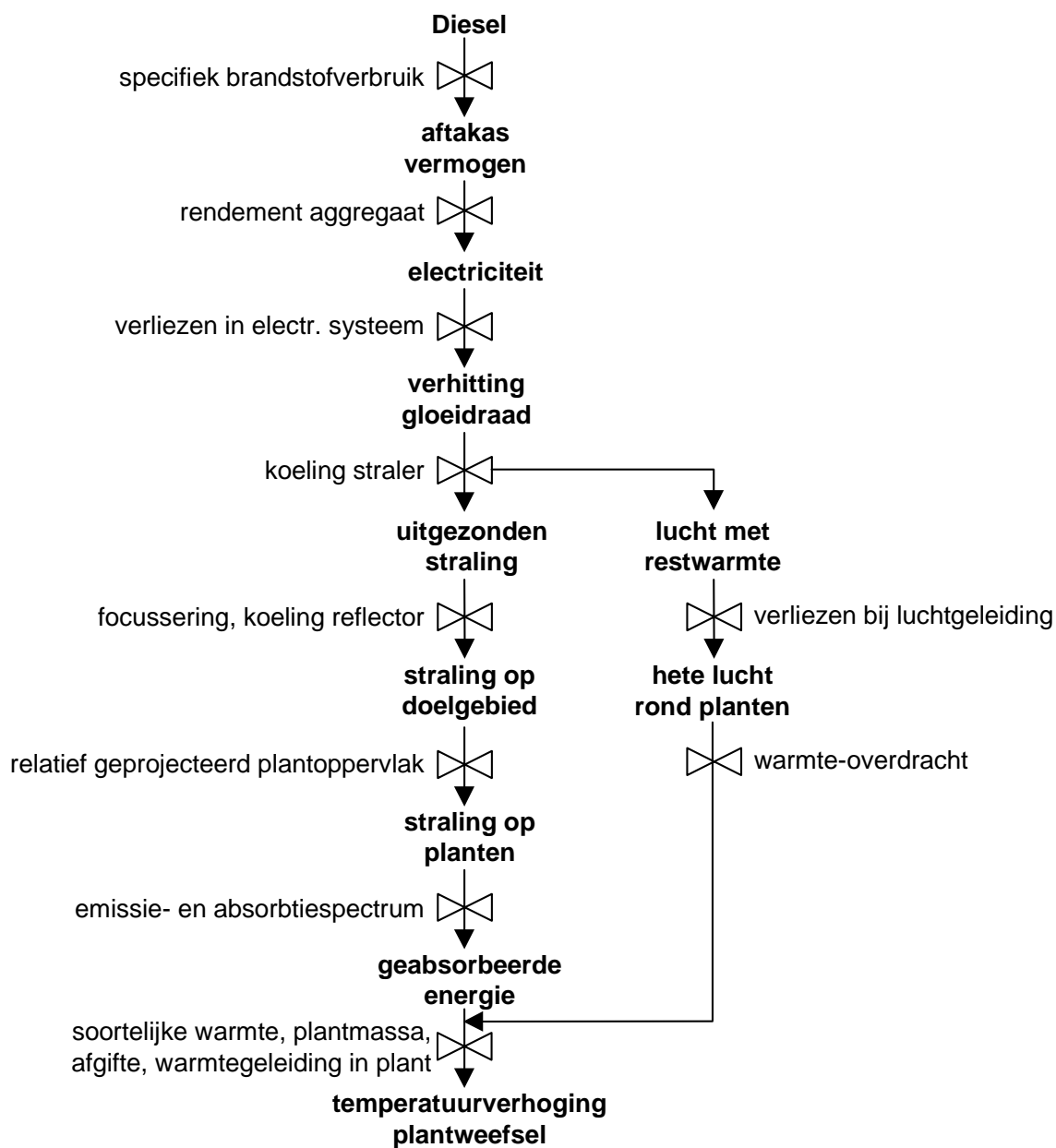
3.1 Factoren die energieoverdracht door straling beïnvloeden

Het omzetten en overbrengen van energie in fossiele brandstoffen naar planten of bepaalde delen daarvan gaat gepaard met verliezen. In figuur 3.1 worden deze verliezen weergegeven voor convectieve overdracht in combinatie met straling in een afgedekte brander en in figuur 3.2 voor gefocusseerde straling van een elektrische lamp met reflector.

Dit rapport beschrijft de belangrijkste transformaties uit de bovenstaande figuren. Theorie over straling, optica en energie overdracht wordt behandeld in boeken van o.a. Monteith en Unsworth (1990), Mohsenin (1984), Wolfe en Zissis (1985) en Sparrow en Cess (1978).



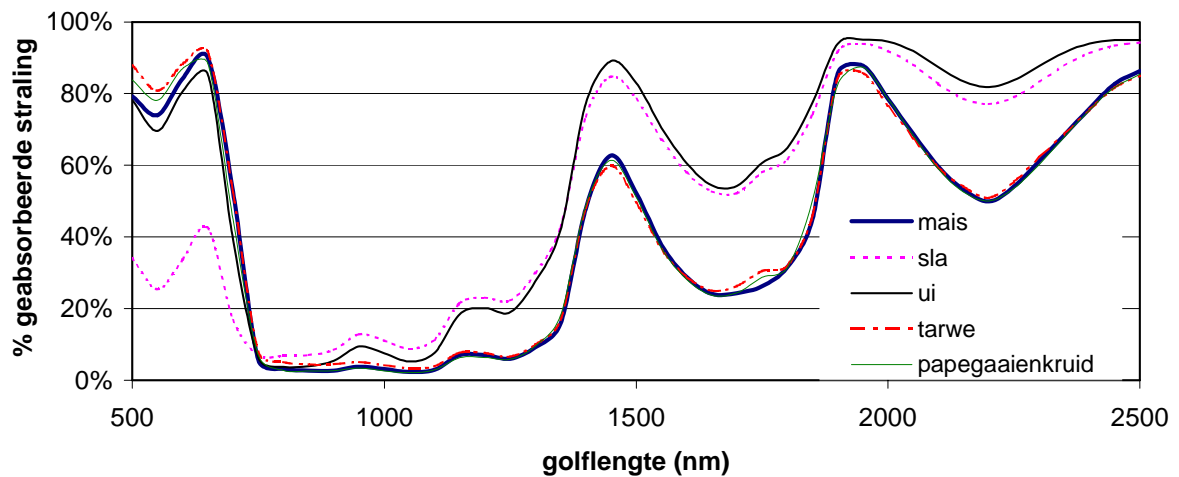
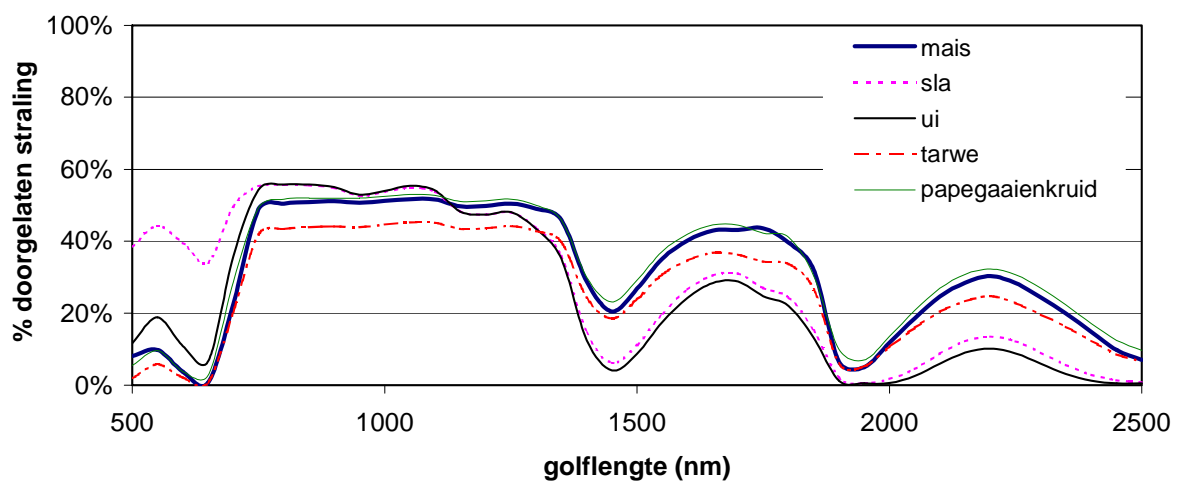
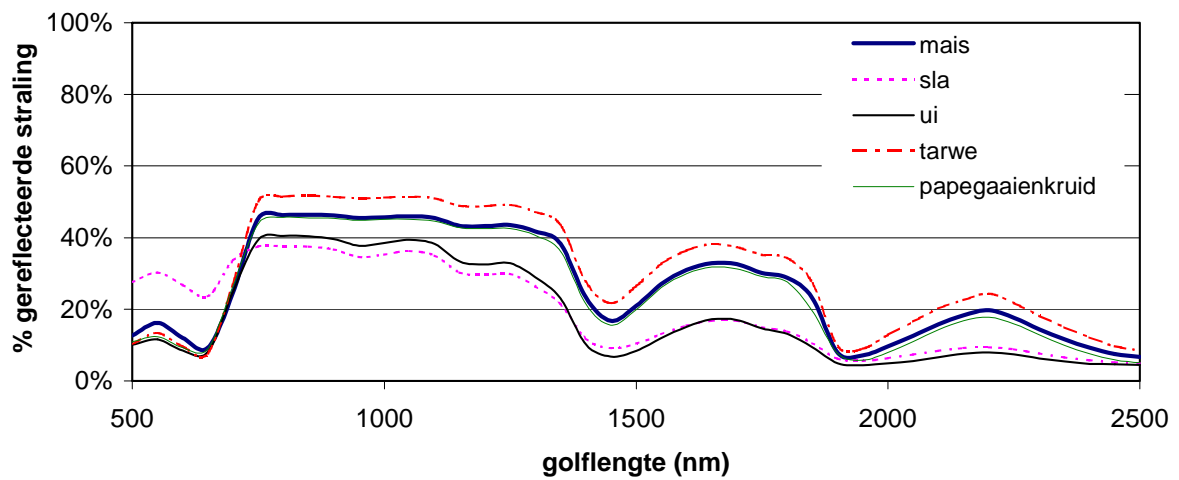
Figuur 3.1 Energieschema voor een LPG-brander met een gasstroomgeleidende afdekking



Figuur 3.2 Energiestroomschema voor een elektrische infraroodlamp met reflector, gevoed door een dieselmotor met aggregaat

3.2 Absorptie van straling door plantaardig materiaal

De verdeling van de uitgestraalde energie over de golflengten is van belang omdat de absorptie, reflectie en transmissie van straling door plantweefsel afhankelijk is van de golflengte (figuur 3.3).



Figuur 3.3 Reflectie (boven), transmissie (midden) en absorptie (onder) van straling door 5 plantesoorten, afhankelijk van de golflengte; gemiddelde van 10 individuele bladeren uit de top van het bladerdek. Gegevens uit Wolfe en Zissis (1985) p 3-134 t/m 3-137.

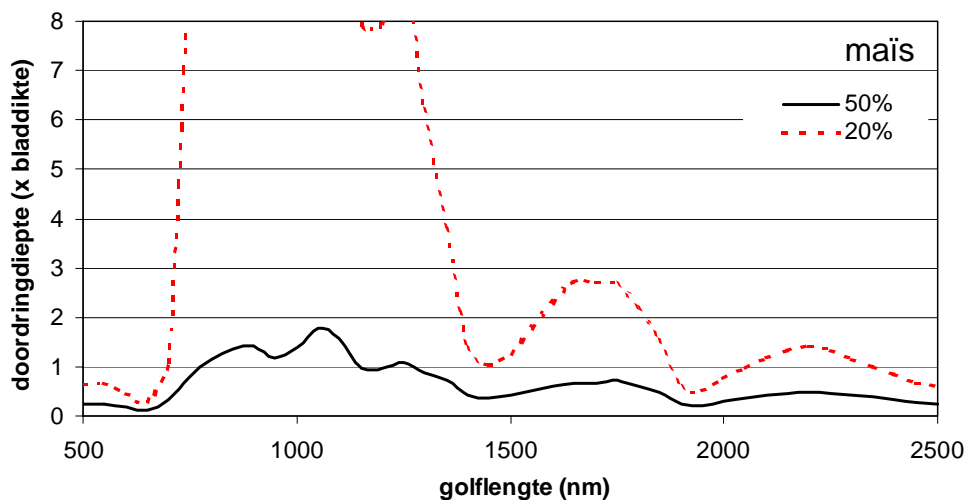
Deze spectra worden bepaald door de spectra van de vaste, vloeibare, dampvormige of gasvormige stoffen in de plant, die elk bepaalde golflengtegebieden absorberen, reflecteren of doorlaten. Omdat planten voornamelijk uit water bestaan, zou infrarode straling met een golflengte van 1.45 en 1.94 μm het beste moeten worden geabsorbeerd (Hooper 1977 in Parish 1989). Volgens Mohsenin (1984) absorbeert water ook straling met een golflengte van 0.77, 0.97, 1.18, 2.24 - 3.27, 4.8 - 8.5 en 12-25 μm . Echter, de absorptiepieken tussen 0.75 en 1.2 μm zijn door de grote reflectie in dat golflengtegebied niet bruikbaar voor energie overdracht.

Het feit dat een deel van de straling wordt doorgelaten, betekent dat ook dieper gelegen weefsels “van binnenuit” kunnen worden verhit. Naarmate men dieper gelegen weefsels wil verhitten moet er naar verhouding meer straling doorgelaten worden, en minder geabsorbeerd. Deze lagere absorptie betekent tevens dat er een relatief klein deel van de energie kan worden overgedragen aan deze dieper gelegen weefsels (b.v. groeipunten van grassen, bladeren of stengels die parallel aan de stralingsrichting staan). Een lage reflectie is sowieso wenselijk.

Als men veronderstelt dat er geen diffuse reflectie plaatsvindt (dus alleen reflectie bij het intreden van de straling in het blad) en dat de spectrale eigenschappen van het blad overal hetzelfde en constant zijn, kan men op basis van gegevens uit figuur 3.3 en de onderstaande formules berekenen hoe ver de straling doordringt in het weefsel (figuur 3.4). Hierbij is r de reflectie, t_1 de transmissie door één bladlaag, t_d de transmissie na het passeren van een d maal zo dikke bladlaag en d_i het aantal bladlagen waarna een fractie i van de straling geabsorbeerd is.

$$t_d = (1 - r) \times \frac{t_1^d}{1 - r}$$

$$d_i = \frac{\log\left(\frac{1 - i}{1 - r}\right)}{\log\left(\frac{t_1}{1 - r}\right)}$$



Figuur 3.4 Diepte (in meervouden van de bladdikte) waarop 50% resp. 20% van de niet-gereflecteerde straling nog niet is geabsorbeerd door bladweefsel van maïs.

Uit figuur 3.4 blijkt dat straling met golflengten tussen 750 en 1450 nm maar voor een klein deel wordt geabsorbeerd in diepere weefsellagen (voor maïs gemiddeld 15% in de laag van 2 tot 6 maal de bladdikte). Met uitzondering van golflengten tussen 1600 en 1800 nm dringt infrarode straling met andere golflengten nauwelijks in deze weefsels door.

Omdat één bladlaag reeds het grootste deel van de absorbeerbare straling opvangt, zal de straling weinig effect hebben op bladeren die door andere worden beschaduwd. Bovendien wordt de plant niet gelijkmatig verhit omdat de door straling af te leggen weg in de plant sterk uiteenloopt (geometrie).

3.3 Het voor planten dodelijke stralingsniveau

Er zijn weinig gegevens beschikbaar over de benodigde hoeveelheid infrarode straling voor het doden van planten. Vanwege de variatie binnen een groep planten van dezelfde soort en stadium en de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de energiestroomdichtheid kan dit energieniveau niet als een simpele drempelwaarde worden gegeven en geeft een dosis-respons curve (zoals figuur 2.1) een meer realistische beschrijving. Bovendien loopt de gevoeligheid van planten uiteen (Ascard 1995b, Vester 1990, Rahkonen en Vanhala 1993, Ascard 1989, Netland et al 1994) vanwege de ligging van groeipunten, beschermende was- of haarlaag, mate van verhouting en weefseleigenschappen.

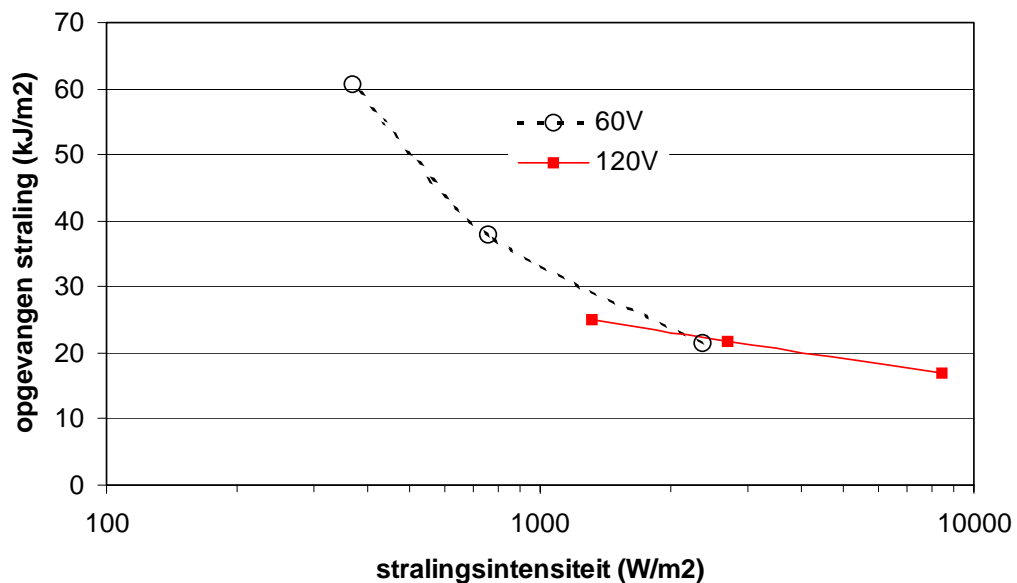
Townsend et al (1995) onderzochten welke hoeveelheid straling toelaatbaar is voor het doden van bacteriën op slabladeren zonder bladbeschadiging en gebruikten daarbij een T3 kwarts IR lamp van 500 W bij 120 V. De piek van het emissiespectrum lag bij 1150 nm (bij 120 V) en 1580 nm (bij 60 V) (resp. 2520 K en 1834 K kleurtemperatuur). Tabel 3.1 geeft combinaties van lamp-blad afstand, blootstellingstijd en spanning, waarbij minder dan 20% van de slabladeren bruine plekken kregen of brandgeur verspreidden. De geabsorbeerde energie waarbij het blad net niet werd beschadigd (kritische energie) is berekend m.b.v. het absorptiespectrum van sla in figuur 3.3, uitgaande van een lamp die naar alle richtingen straalt, 15 mm gloeidraad - glasbol afstand en 90% stralingsefficiëntie.

Niet-beschadigde bladeren hadden altijd een temperatuur beneden 60 °C. De kritische energie neemt lineair toe met de blootstellingstijd ($R^2 = 0.96$, $p < 0.01$). De maximum bladtemperatuur neemt lineair af met toenemende stralingsintensiteit ($R^2 = 0.68$, $p < 0.05$). De efficiëntere bladbeschadiging bij hogere stralingsintensiteit wijst op een mogelijke rol van warmtegeleiding binnen het slablad. Hoewel het blad bij 120 V een kleiner deel van de opgevallen straling absorbeert (59% i.p.v. 75% bij 60 V), leidde de hogere stralingsintensiteit tot een kleinere kritische energie (figuur 3.5).

De in tabel 3.1 en figuur 3.5 gegeven stralingsdoses zijn waardes waarbij een plant nog net niet beschadigd wordt. Voor doding zijn grotere doses nodig.

Tabel 3.1 Combinaties van blootstellingstijd, lampspanning en afstand van lamp tot het blad waarbij minder dan 20% van de slabladeren zichtbaar verkleurd was of brandgeur verspreidde (naar Townsend et al 1995). Bij de berekening van de geabsorbeerde hoeveelheid energie is uitgegaan van een puntvormige lichtbron die naar alle kanten straalt, 15 mm afstand tussen gloeidraad en glazen lampbol en een constant stralingsrendement van de lamp. De berekende fractie geabsorbeerde straling (59% bij 120 V, 75% bij 60 V) is gebaseerd op het absorptiespectrum van slablad uit Mohsenin (1984).

blootsteltijd (s)	lamphoogte (cm)	spanning (V)	stralingsintensiteit (W/m ²)	geabsorbeerde energie (kJ/m ²)	maximum bladtemp (°C)
2	5	120	5595	6.6	45.1
9	5	60	1567	10.6	48.6
8	10	120	2119	10.0	58.7
50	10	60	593	22.2	59.4
19	15	120	1105	12.4	57.5
165	15	60	309	38.3	59.6



Figuur 3.5 De invloed van de stralingsintensiteit op de berekende hoeveelheid op het blad vallende straling die slablad net niet beschadigde in experimenten van Townsend et al (1995).

Parish (1989) onderzocht de benodigde hoeveelheid straling voor het doden van gele mosterd en raaigras in 2 stadia, met vier typen stralers en drie blootstellingstijden. 200 kJ/m² straling van een buisvormige kwartslamp (bij 950°C, piek-golflengte 2.6 μm, 33.3 kW/m²) was dodelijk voor kiemplanten van gele mosterd (4 cm hoog, 9 dagen na zaai). Voor het doden van raaigras in het driebladstadium was 400 kJ/m² nodig. Deze gegevens zijn gebaseerd op de stralingsintensiteit en

blootstellingsduur. Het is echter niet duidelijk op welke hoogte de stralingsintensiteit is gemeten en welk percentage bestrijding met de genoemde energieniveaus zijn bereikt. Ook is uit dit experiment het effect van stralingsintensiteit niet af te leiden en is een deel van de warmte waarschijnlijk op convectieve wijze overgedragen.

De effectiviteit van verhitting berust op het beschadigen van celmembranen en het versnellen van het daarop volgende vochtverlies (Sutcliffe 1977, Ellwanger et al 1973a, 1973b, Vester 1990 in Ascard 1995b). In experimenten met convectieve warmte-overdracht lag de dodelijke temperatuur tussen 55 en 94 °C (Anderson et al 1967, Daniell et al 1969, Hansen et al 1970, Porterfield et al 1971, Hoffmann 1989 in Ascard 1995a) bij blootstellingstijden tussen 0.065 en 0.13 seconden (Thomas 1964, Daniell et al 1969 in Ascard 1995a). Het lijkt redelijk om te veronderstellen dat de weefseltemperatuur bepalend is voor de mate van beschadiging (Bertram 1996) en dat de gevoeligheidsverschillen tussen planten vooral zijn terug te voeren op de ruimtelijke heterogeniteit van de bereikte weefseltemperaturen, door temperatuurgradiënten binnen een blad of stengel. De warmtestroomdichtheid door warmtegeleiding binnen een plant is doorgaans erg klein ten opzichte van de convectieve warmtestroomdichtheid die ontstaat bij temperatuurverschil tussen omgeving en plant (Bertram 1996).

In het algemeen neemt de dodelijke temperatuur af naarmate de blootstellingstijd aan hete lucht toeneemt (Daniell et al 1969, Sutcliffe 1977, Levitt 1980, Batchelder et al 1970, Lalor en Buchelle 1970, Bashford et al 1972, Storeheier 1991, 1994 in Ascard 1995a). Dit is waarschijnlijk een gevolg van de beperkte warmtegeleiding binnen de plant bij korte blootstellingstijd. Omdat straling planten “van binnen uit” verhit, is het niet zo vreemd dat Townsend et al. (1995) met straling een tegenovergestelde trend vonden.

Als men kan aannemen dat weefsel gelijkmatig wordt opgewarmd en dat tijdens het verhittingsproces de warmteafgifte van de plant verwaarloosbaar is en het absorptiespectrum van het blad niet verandert, leveren combinaties waarbij de stralingsintensiteit omgekeerd evenredig is met de blootstellingsduur hetzelfde dodend effect. Met andere woorden: de dodelijke dosis straling (J/m^2 of $J/plant$) is niet afhankelijk van de intensiteit. Bij convectieve warmteoverdracht gaat een soortgelijke hypothese niet op, omdat de temperatuurgradiënt over langere tijd moet worden gehandhaafd om ook dieper gelegen weefsels te verwarmen. Hoewel deze hypothese nog niet is getoetst voor doding door middel van straling, suggereert figuur 3.5 dat de benodigde stralingsenergie afhankelijk is van de stralingintensiteit.

Het is niet duidelijk of expansie van water (damp) of denaturering van eiwitten (chlorofyl, eiwitten in celwand) het meest verantwoordelijk is voor beschadiging. Bij convectieve warmteoverdracht is deze vraag van minder belang omdat deze stoffen niet selectief kunnen worden verwarmd. Volgens de quantum mechanica benadering kunnen specifieke moleculen slechts door bepaalde discrete energieniveaus op een hoger (rotatie- en trillings-) energieniveau worden gebracht. Daarom moet het met monochromatische straling mogelijk zijn om slechts bepaalde moleculen “aan te slaan”. Omdat

een plant voor ca. 90% uit water bestaat en omdat water een hoge soortelijke warmte heeft, is het aantrekkelijk om een plant te doden zonder energie te besteden aan het opwarmen van al dat water.

Als moleculen slechts door bepaalde discrete golflengten worden “aangeslagen”, blijft de energie in de overige golflengten van een stralend lichaam of gas (van elektische of gasgestookte stralers) onbenut. Om die reden zou het gebruik van monochromatische straling van bijvoorbeeld lasers erg efficiënt kunnen zijn, mits die straling efficiënt kan worden opgewekt. Door de hoge stralingsdichtheid (b.v. 1.4 MW/cm²) op een klein gebied (b.v. 0.3 mm diameter) worden lasers vooral gebruikt voor het snijden van diverse materialen (zie hoofdstuk 5).

In experimenten van Bayramian et al (1992) met een 10 W CO₂ laser (straaldikte 6 mm) was een energiedichtheid van 2620 kJ/m² weefsel voldoende om het transportweefsel van wilde have en rogge te blokkeren. Couch en Gangstad (1974a abstract gelezen) bestraalden *Lemna minor* planten met een CO₂-N₂-He laser met 10.6 μm golflengte en een stationaire bolle spiegel. Een bewegende vlakke spiegel gaf een gelijkmatiger stralingsintensiteit (Long en Smith 1975 abstract gelezen). Bestraling met een energiedichtheid van 1000 KJ/m² was dodelijk, terwijl bij 100 kJ/m² alleen de voortplanting werd verhinderd. De groei van waterhyacint (*Eichhornia crassipes*) werd reeds geremd bij 10 kJ/m², terwijl 40 kJ/m² de fotosynthese in behandeld bladweefsel halveerde (Couch en Gangstad 1974b abstract gelezen).

Een overdosis aan straling in het zichtbare gebied (< 700 nm) kan fotooxidatie van chlorofyl en beschadiging van het fotosysteem veroorzaken (Srivastava & Strasser 1997, Horton et al. 1996, Long et al 1994, Bjorkman & Biggins 1987). Inzichten uit de moleculaire biologie en plantenfysiologie bieden mogelijk nog andere aanknopingspunten voor het doelmatig beschadigen van planten met UV straling of straling in het zichtbare gebied. In dit rapport worden deze mogelijkheden niet verder onderzocht omdat de studie zich beperkt tot infrarode straling.

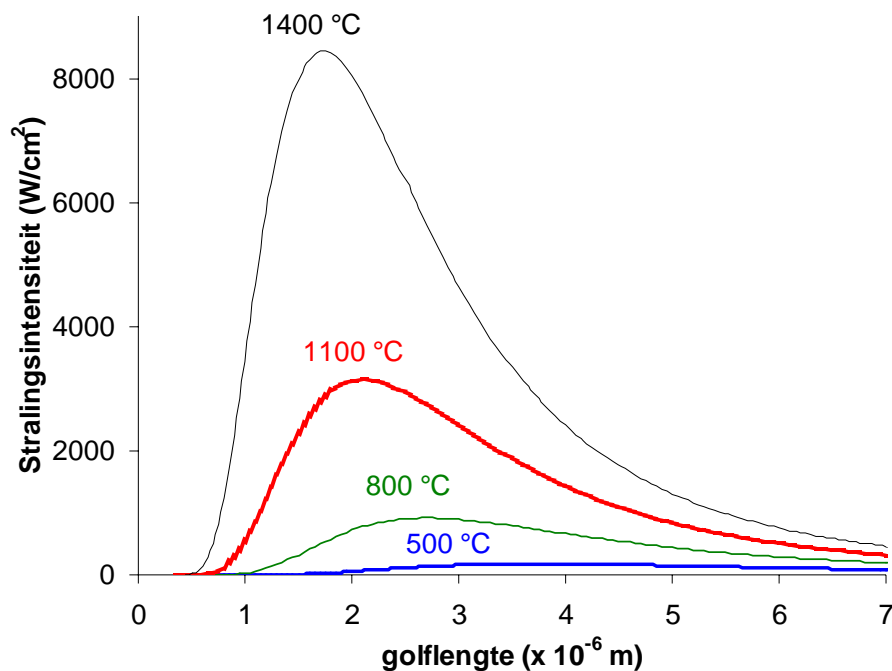
4 Overdracht van stralingsenergie door gasgestookte en elektrische stralers

4.1 Emissiespectrum

Het als straling afgegeven vermogen van een voorwerp (Φ [W]) wordt bepaald door het oppervlak (A [m^2]), de temperatuur (T [K]) en de emissiefactor van het materiaal (ϵ):

$$\Phi = A\epsilon\sigma T^4 \quad (\text{wet van Stefan-Boltzmann})$$

Hierbij is σ de emissiecoëfficiënt voor een absoluut zwart lichaam ($5.67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$). Voor een zwart lichaam geldt dat $\epsilon=1$. Voor een zogenaamd "grijs" lichaam geldt $0 < \epsilon < 1$, waarbij ϵ onafhankelijk is van de temperatuur en de golflengte. De uitgestraalde straling beslaat een bepaald golflengtegebied. Naarmate de temperatuur stijgt, straalt het voorwerp meer kortgolvlige straling uit en neemt de energie-inhoud van de straling toe (figuur 4.1).



Figuur 4.1 Emissiespectrum van een zwarte straler bij verschillende temperaturen.

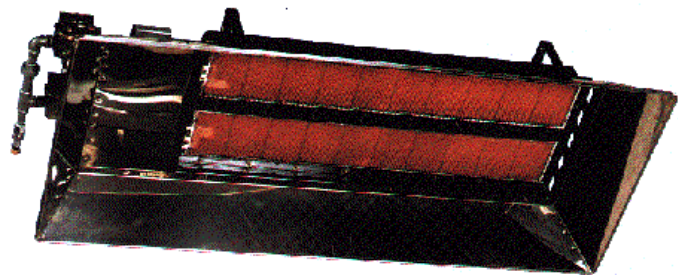
Het emissiespectrum van de meeste infraroodbronnen lijkt op de in figuur 4.1 weergegeven Planck-krommen. Elektrische infraroodlampen (figuur 4.2) realiseren hogere temperaturen (normaal 2200 -

2400 °C, max ca. 2700 °C) dan gasgestookte stralers (figuur 4.3)(normaal 500-900 °C, max ca. 1200 °C) (Pettersson 1995). Het emissiespectrum kan worden veranderd door de straling van de eigenlijke straler (b.v. een draad van wolfram) geheel of gedeeltelijk door een ander voorwerp te laten absorberen. Dit voorwerp wordt verhit en zendt vervolgens straling van een lagere golflengte uit. Hierbij gaat een deel van de energie verloren doordat een groter oppervlak in contact komt met (koelende) lucht.

Het emissiespectrum van gasgestookte stralers wijkt af van figuur 4.1 doordat hete waterdamp en CO₂ pieken veroorzaken in het golflengtegebied tussen 2-3 en 4-5 µm. Johansson (1991 in Pettersson 1995) schat de bijdrage van hete gassen in de totale stralingsemisatie op 20%.



Figuur 4.2 Elektrische IR straler met parabolische reflector (foto IRT)



Figuur 4.3 Gasgestookte infraroodstraler voor verwarming van grote ruimten (Foto HOAF)

4.2 Elektrische stralers

Pettersson (1995) geeft een overzicht van diverse typen elektrische en gasgestookte infraroodstralers, en hun efficiëntie voor het drogen van papier en verf. De elektrische lampen (van glas) of buizen (van glas of kwarts) zijn vacuüm of gevuld met een inert gas (N of Ar) en hebben een gloeidraad van wolfram. Stralers met een groot vermogen hebben vaak met halogeengas gevulde buizen. Glas absorbeert straling met golflengten langer dan 4 µm en heeft daardoor een temperatuur van ca. 420 °C. Kwarts is vrijwel geheel doorlatend voor infrarode straling en draagt bij aan de straling in het midden-infrarode gebied, doordat de oppervlaktetemperatuur tijdens bedrijf oploopt tot 800-900 °C.

Kwartsbuizen hebben soms een interne reflector, zijn 20-150 cm lang en hebben een vermogen van 500 - 7000 W (doorgaans ca. 5000 W per meter buislengte).

Van het elektrisch vermogen wordt ca. 70% (Salmela en Ojala 1994 in Pettersson 1995) tot 84% (Björnberg 1988 in Pettersson 1995) omgezet in infrarode straling. Door achter de stralingslamp een vlakke gouden reflector of een vlakke keramische reflector te monteren komt 60% resp. 50-54% van de elektrische energie als straling op het te verwarmen voorwerp terecht (Björnberg 1988 in Pettersson 1995). Evin (1992 in Pettersson 1995) construeerde een straler met beter doorlatend beschermglas en een beter reflecterende concave keramische reflector, die 75% stralingsrendement opleverde. De verdere ontwikkeling van elektrische stralers is gericht op het aanpassen van het emissiespectrum (materiaalkeuze en geometrie van reflectors), het verminderen van convectieve warmteverliezen zonder beperking van de levensduur en het verhogen van de stralingsdichtheid (Pettersson 1995).

4.3 Gasgestookte stralers

Gasgestookte stralers hebben een lagere temperatuur en stralen ver- of middeninfrarode straling uit, o.a. afhankelijk van het type (beschreven door Pettersson 1995, en o.a. Krieger 1992):

1. Stralende pijp, waarbinnen het gas - zuurstofmengsel wordt verbrand (beschreven door Krenin 1990).
2. Katalytische brander en keramische brander, bestaande uit een gasmengend onderdeel en een poreuze plaat, dat het stralend oppervlak is (400-600°C). De vlam ontstaat vlak buiten de poreuze plaat en verhit vaak ook een metalen rooster, hetgeen de efficiëntie verhoogt. Bij branders met een vlambreukplaat ("impingement-type burner") heeft de verbranding plaats in een soort verbrandingskamer. In plaats van een poreuze keramische plaat worden ook wel een vezelmatrix of keramisch schuim gebruikt.
3. Keramische of metalen plaat verhit door een open vlam.

De stralingsefficiëntie loopt erg uiteen (van ca. 22% tot ca. 63%) en is afhankelijk van het luchtoverschot en de luchttemperatuur, waardoor de vlam als het ware gekoeld wordt (Senström 1993 in Pettersson 1995). Verschillende auteurs vonden een hoge efficiëntie voor branders met een poreuze keramische plaat of vezelmatrix (50-70%, Ruiz en Singh 1992, Duffy et al. 1983, Johansson 1991 in Pettersson 1995). Voor een zwart stralerooppervlak berekenden Speyer et al. (1996) dat bij een stijging van de verbrandings-intensiteit van 200 tot 400 kW/m² de maximaal haalbare efficiëntie daalt van 63% tot 55%, waarbij de stralertemperatuur stijgt van 950 tot 1150°C. Een brander met een stalen vlambreukplaat was het efficiëntst (52.5%) bij 200 kW/m² verbrandingsintensiteit.

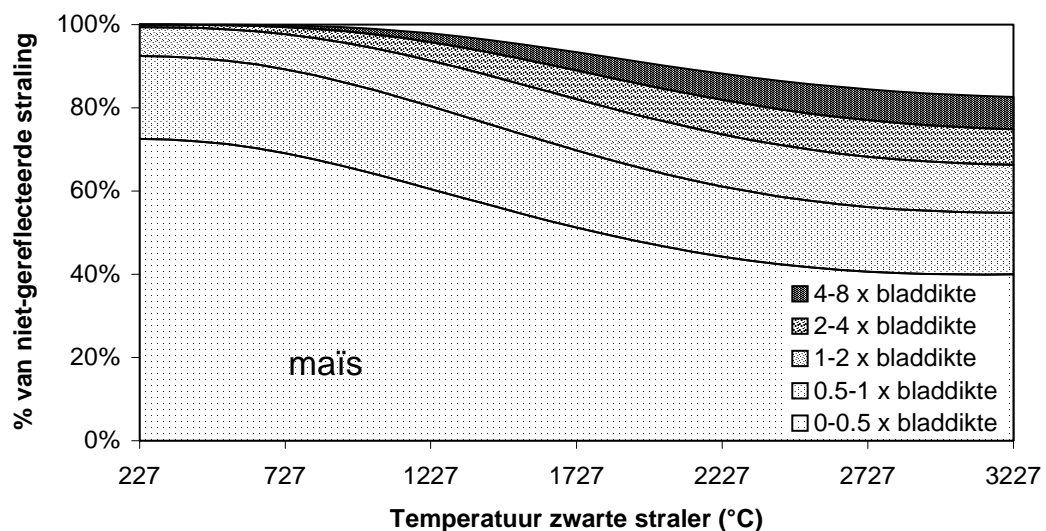
Verdere ontwikkeling van gasgestookte infraroodstralers is gericht op het verhogen van de stralingsintensiteit en efficiëntie en het verlagen van de emissie (NO_x), voornamelijk door betere materialen. Madsen (1993 in Pettersson 1995) stelde dat in de nabij toekomst branders worden

ontwikkeld met een emissiespectrum dat is aangepast aan het absorptiespectrum van het bestraalde materiaal.

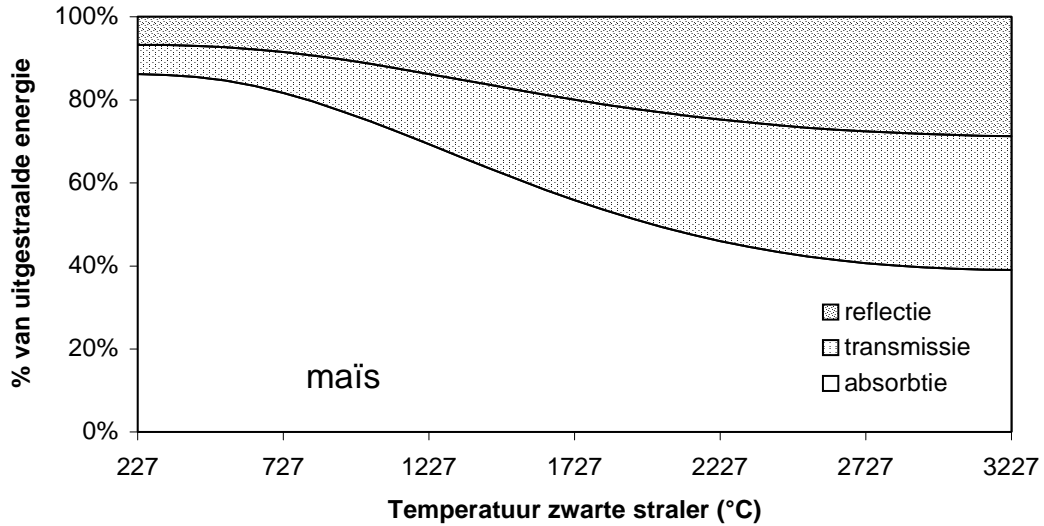
4.4 Overdrachtsefficiëntie in relatie tot stralertemperatuur

Door de gegevens over absorptiespectra van planten en het emissiespectrum van stralers te combineren kunnen de doordringdiepte van straling in weefsel (figuur 4.4) en de efficiëntie van de stralingsabsorptie (figuur 4.5) worden berekend in relatie tot de temperatuur.

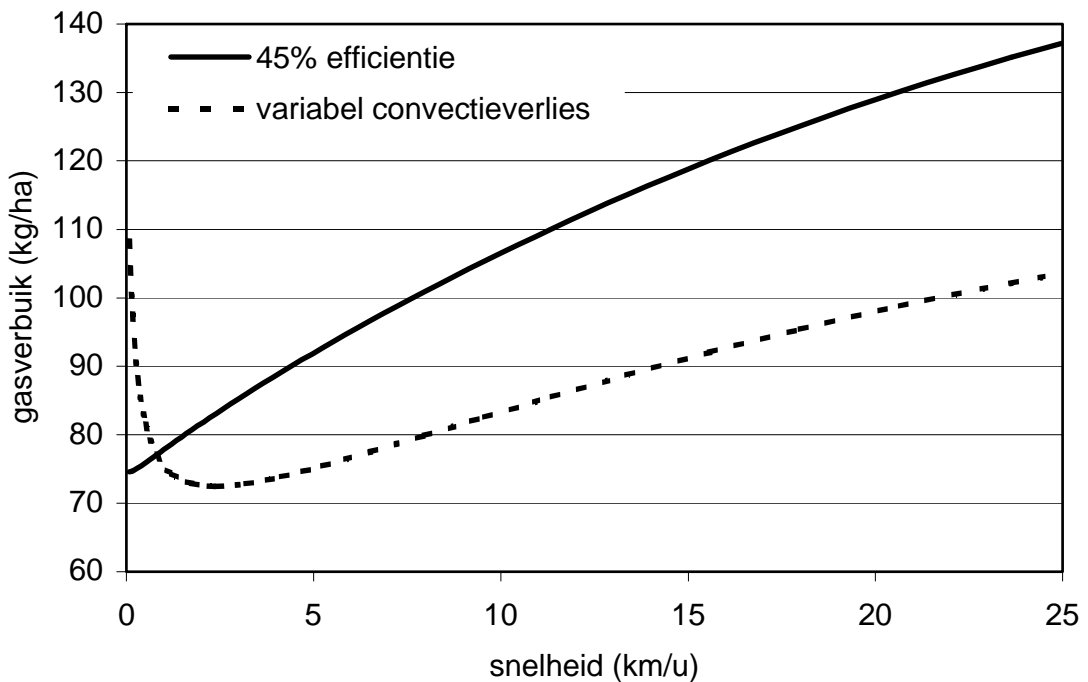
Volgens Pettersson (1995) zijn infrarood-drogers voor papier in essentie oppervlakte-drogers en dringt de straling van magnetrons (golflengte 500 μm - 0.3 m) of drogers met radiogolven (golflengte 0.3 m - 60 m) dieper door. Figuur 4.4 toont dat bij lage stralertemperaturen de plant vooral oppervlakkig wordt verhit en dat bij verhoging van de stralertemperatuur een relatief groter deel van de straling tot diepere wefselflagen doordringt. Bij een lage temperatuur worden dus vooral kleine onkruidplanten gedood, terwijl planten dieper liggende groeipunten gespaard blijven. Voor onkruidbestrijding na opkomst van gewassen zoals maïs en uien is deze zogenaamde selectiviteit een gunstige eigenschap. Bij toepassing op verhardingen is selectiviteit echter ongewenst, zodat een hogere stralertemperatuur nodig is, vooral bij grote onkruiden.



Figuur 4.4 Verdeling van de niet-gereflecteerde infrarode straling binnen een maïsblad, afhankelijk van de temperatuur van een zwarte straler.



Figuur 4.5 Berekende absorbtie, transmissie en reflectie van de door een zwarte straler geproduceerde energie in een maïsblad, bij verschillende stralertemperaturen.



Figuur 4.6 Berekende relatie tussen capaciteit en efficiëntie van een gasgestookte straler met een oppervlak van 100x100 cm, op 10 cm boven het grondoppervlak. Dodelijke dosis stralingsenergie: 21.5 kJ/m². Bij het variabel convectieverlies van het stralerooppvlak (naar boven en beneden) wordt 38% van het totale vermogen gebruikt voor het verhitten van (verbrandings) lucht. Deze fractie is gebaseerd op een veronderstelde stralingsefficiëntie van 45% bij 900 K stralertemperatuur en een gasgebruik van 6.23 kg LPG/ m werkbreedte (door Ascard (1998) gebruikte infraroodbrander HOAF Agrodynamic V6).

Bij een hogere stralertemperatuur wordt relatief meer straling uitgezonden met golflengten tussen 750 en 1350 nm (figuur 4.1). Omdat de plant deze straling nauwelijks absorbeert, daalt de efficiëntie van de energie overdracht bij toenemende stralertemperatuur (figuur 4.5).

Omdat de hoeveelheid uitgestraalde energie per m² stralerooppervlak bij lagere stralertemperatuur afneemt, is een groter oppervlak nodig voor het produceren van een vergelijkbaar vermogen aan beter absorbeerbare, langgolelige straling. Zonder oppervlaktevergroting moet een plant langer onder de straler verblijven om hetzelfde vermogen op te vangen (lagere rijsnelheid), zodat de capaciteit daalt (figuur 4.6). Naarmate de benodigde verblijftijd langer is, verliest de plant een groter deel van de geabsorbeerde energie weer aan de omgeving. Bij lagere stralertemperaturen zijn de warmteverliezen aan de lucht bij het stralerooppervlak relatief groot.

Deze langere verblijftijd kan worden bereikt door een verlaagde rijsnelheid of een verlengd stralerooppervlak. Verlenging van het stralerooppervlak maakt de machine echter duurder, zwaarder en minder wendbaar. Aangezien de aanschafprijs en de loonkosten (capaciteit) samen het grootste deel van de bestrijdingskosten vormen, heeft een hoge stralertemperatuur de voorkeur. Echter, als bij een stralertemperatuur van 1027 °C de maximum stralingsintensiteit van ca. 150 kW/m² wordt bereikt, is de haalbare rijsnelheid van een 1.5 m lange gasgestookte straler bij een dodelijke stralingsdosis van 21.5 kJ/m² beperkt tot 4.8 km/u.

Empirische gegevens over het effect van stralingsintensiteit, blootstellingsduur en spectrale verdeling op de benodigde energie om planten te doden zijn zeer schaars en de dodelijke stralingsdoses die in literatuur (hoofdstuk 3.3) wordt gegeven lopen uiteen van ca. 20 tot 2600 kJ/m². Omdat de temperatuur en emissiecoëfficiënt van het stralerooppervlak van onkruidbranders niet is gegeven, werden bij berekeningen voor figuur 4.6 en het bovenstaande voorbeeld grove aannames over het energieverlies door convectie aan het stralerooppervlak en verhitting van de verbrandingslucht gedaan. De convectieverliezen Q [W] aan de boven- en onderkant van het stralerooppervlak werden geschat met de wet van Nusselt-Hencky, waarbij b varieert tussen 3.3 en 4.6, afhankelijk van de luchtbeweging en de grootte van het oppervlak:

$$Q = A_{\text{straler}} \times \alpha \times \Delta T \quad \text{met } \alpha = b \times \sqrt[4]{\Delta T}$$

Verder werd verondersteld dat de fractie van het vermogen dat wordt gebruikt voor het verhitten van de lucht evenredig is met het totale vermogen. Als bij 900 K stralertemperatuur een stralingsefficiëntie van 45% wordt verondersteld, varieert deze fractie tussen 38.4% bij $b=4.6$ en 43.1% bij $b=3.3$. De veronderstelde stralertemperatuur en stralingsefficiëntie beïnvloeden echter deze parameterwaarde (27.6% bij 700K, $b=4.6$ en 47.4% bij 1100 K, $b=3.3$).

4.5 Focussing van straling op planten en kleine doelgebieden

Theoretisch geeft een relatief lage temperatuur in combinatie met een hoge stralingsintensiteit de meest efficiënte onkruidbestrijding. Als focussing kan worden toegepast op gasgestookte stralers, is hun lagere temperatuur minder beperkend voor hun capaciteit. Door de combinatie met het grote vermogen, de goedkope brandstof, de benutting van hete verbrandingsgassen en het ontbreken van transformatieverliezen (verbrandingsmotor, aandrijving en aggregaat bij elektrische stralers), zou een gasgestookte straler in principe een efficiënte onkruidbestrijder kunnen zijn met een hoge capaciteit.

Hoewel het in principe mogelijk is om een groter stralend oppervlak kleiner af te beelden met spiegels, wordt deze mogelijkheid - voor zover bekend - niet toegepast bij gasgestookte infraroodstralers.

Stralers met een poreuze metalen of keramische plaat stralen alleen aan de onderzijde, zodat het plaatsen van spiegels achter de straler geen nut heeft.

Bij stralende pijpen kunnen spiegels op twee manieren worden gebruikt:

- 1) Een bolle spiegel zendt de in ongewenste richting uitgezonden straling terug naar de pijp, die daardoor nog heter wordt en een hogere stralingsintensiteit bereikt.
- 2) Een elliptische spiegel projecteert de in ongewenste richting uitgestraalde straling naar de doelstrook, zoals aangegeven in figuur 4.7.

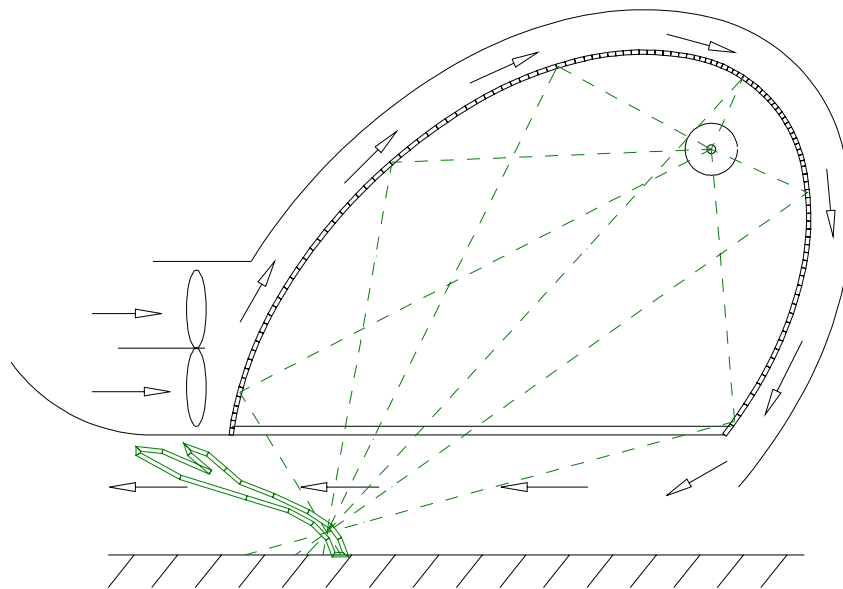
Door de hogere temperatuur hebben elektrische stralers een hogere stralingsintensiteit (100 - 500 kW/m²) dan gasgestookte stralers (tot ca. 150 kW/m²) (gegevens van fabrikanten, Pettersson 1995). Omdat het stralende lichaam van elektrische stralers (een wolframdraad) compact is, kan een deel van de uitgezonden straling eenvoudig met behulp van een ellipsvormige keramische of gouden reflector worden geprojecteerd op een brandlijn met een zeer hoge stralingsintensiteit (figuur 4.2). Deze brandlijn zou kunnen functioneren als een "stralingsmes", zodat niet de hele plant hoeft te worden verhit.

Het gebruik van reflectoren verkleint het deel van de straling dat niet op de te behandelen strook valt. Bij een opstelling zoals getekend in figuur 4.7 is de straler in het brandpunt van een elliptische reflector gemonteerd, zodat 83% van de straling wordt gereflecteerd naar de brandlijn. Elektrische stralers die in het brandpunt van een parabolische spiegel zijn gemonteerd produceren een parallelle stralingsbundel, zodat de maximale stralingsintensiteit lager is dan die van elliptische spiegels. Door meerdere lampen met reflectoren te richten op dezelfde strook kan de stralingsintensiteit verder worden verhoogd.

Reflectoren absorberen een klein deel van de stralingsenergie en worden dus verhit, waardoor ze zelf ook gaan stralen en warmte uitwisselen met de omgevingslucht. Afhankelijk van de optische eigenschappen, oppervlakte van de reflector en (eventueel geforceerde) koeling door lucht ontstaat bij een bepaalde temperatuur een evenwicht tussen warmteafgifte en stralingsabsorptie. Deze temperatuur is in veel gevallen zo hoog dat corrosie optreedt, waardoor de reflectie afneemt. Omdat

goud de hoogste reflectie in het nabij-infrarood heeft en bij hoge temperatuur niet dof wordt, zijn reflectoren voor een lange levensduur vaak van goud gemaakt.

Hoewel reflectoren de uitgezonden straling kunnen bundelen op een lijn of een strook met kleine breedte (een gewasrij of voegen tussen stoeptegels), komt een deel van de straling niet op planten terecht. De energie die op de grond terechtkomt kan ook niet worden herwonnen, zoals bij circulerende hete lucht.



Figuur 4.7 Concept van een elektrische straler met een elliptische, luchtgekoelde reflector, die 83% van de uitgezonden straling focuseert op de brandlijn, waar planten gedeeltelijk worden verhit. Een glasplaat beschermt reflector en lamp tegen vervuiling. De hete lucht buigt planten voorover, brengt warmte over op planten, en blaast afgeschroeide delen weg.

4.6 Stralerpositionering

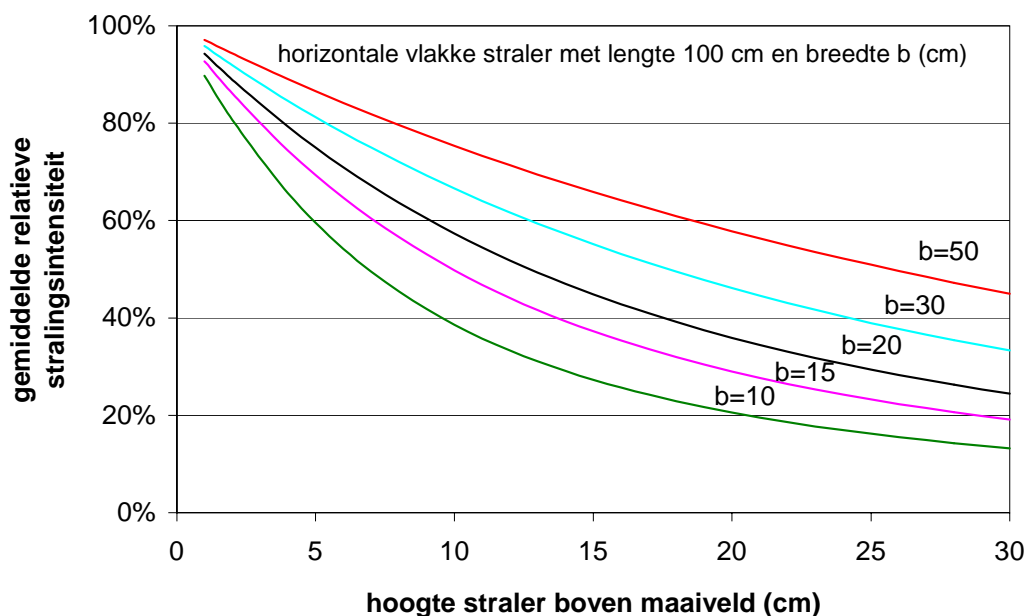
Elektrische stralers met een brandlijn vergen een nauwkeurige besturing, zowel wat betreft de verticale als de horizontale positionering. De nauwkeurigheid hangt af van de brandpuntsafstand van de elliptische spiegel. Als dergelijke stralers dicht bij het verharde oppervlak worden geplaatst, zouden onkruiden de straler kunnen vervuilen of de werking hinderen. De onregelmatigheid van het verharde oppervlak zou bovendien de afmetingen van de straler kunnen beperken. Bij een parallelle stralingsbundel mag de afstand tot het verharde oppervlak groter zijn en is geen nauwkeurige hoogteregeling nodig.

Conventionele gasgestookte IR stralers voor onkruidbestrijdingstoepassingen bestaan uit ca. 100 cm lange vlakke stralers (zoals in figuur 4.3), die op een bepaalde hoogte boven het maaiveld in de lengterichting worden voortbewogen. Naarmate die hoogte toeneemt neemt de intensiteit van de straling op maaiveld-niveau af en komt een kleiner deel van de uitgezonden straling op de strook onder de straler terecht (figuur 4.8). Als het te bestrijden onkruid alleen in een smallere doelstrook staat is een smallere straler efficiënter (figuur 4.9), maar dit gaat gepaard met een kleinere stralingsintensiteit.

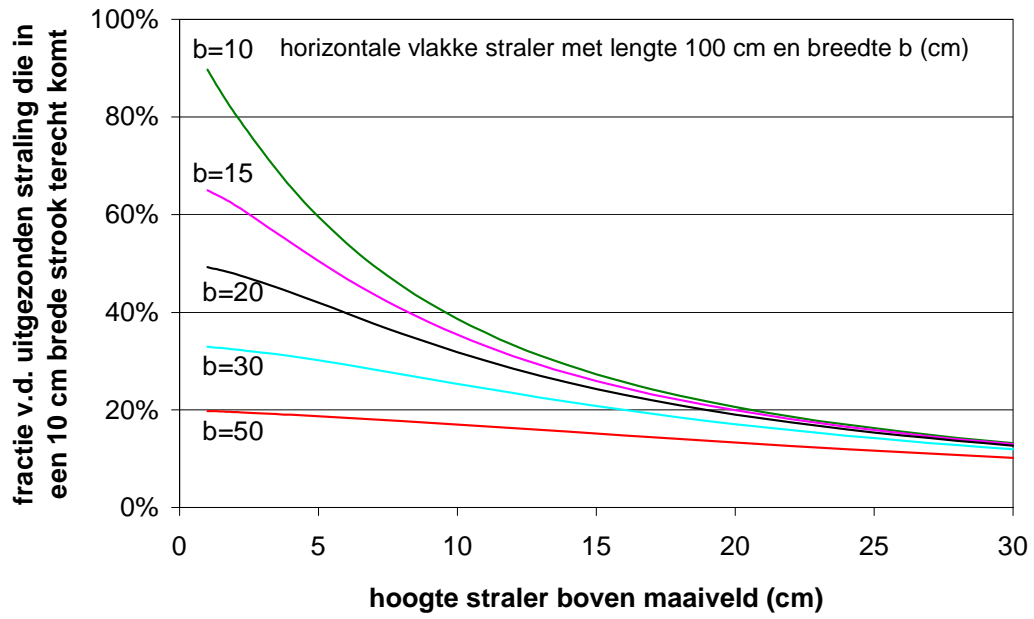
Als de door Klooster (1983) gebruikte infraroodbrander ($l \times b = 125 \times 22$ cm) op 10 cm boven het grondoppervlak hangt, komt 61% van de straling op de grond onder de straler terecht en 31% in een 10 cm brede strook onder het midden van de straler. De stralingintensiteit in die strook bedraagt dan 68% van de uitgestraalde intensiteit. Als door een vlakke grond en goede hoogteregeling de afstand van straler tot maaiveld gehalveerd kan worden, komt 77% recht onder de straler terecht, 39% in een 10 cm brede strook, met een relatieve intensiteit van 87%.

Een groot branderoppervlak beperkt de stralingsverliezen maar kan minder dicht bij het verharde oppervlak worden geplaatst, met het oog op beschadigingsgevaar door onregelmatigheden. Vergroting van het straleroppervlak leidt verder tot een lagere wendbaarheid, een hoger gewicht en een hogere aanschafprijs.

Bij het berekeningen voor het bovenstaande voorbeeld en voor figuur 4.8 en 4.9 is de bijdrage van de indirecte straling van de verticale afschermingsplaten aan de rand van de straler verwaarloosd. De formules en hun afleiding zijn opgenomen in bijlage A.



Figuur 4.8 Berekende stralingsintensiteit op het maaiveld onder een vlakke straler (% van intensiteit stralend oppervlak). Dit is tevens het deel van de straling dat recht onder de straler terecht komt.



Figuur 4.9 Invloed van de stralerbreedte en afstand tot het maaiveld op de fractie van de straling die in een 10 cm brede strook onder het midden van de straler terecht komt.

5 Lasers

5.1 Werkingsprincipe en typen

De straling van gasgestookte en elektrische stralers wordt uitgezonden door een heet oppervlak (wolframdraad, reflector, poreuze keramiek), vlammen en verbrandingsgassen, en beslaat een breed spectrum. Bij een laser (acroniem voor “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”) wordt een gas(mengsel), halfgeleider, diode, kristal of vloeistof “aangeslagen” door een elektrisch spanningsverschil of door flitslicht. De straling die vrijkomt bij de terugval van moleculen in lagere energieniveaus weerkaatst vaak meerdere malen tegen de spiegels aan de uiteinden van de buis en slaat weer andere moleculen aan, zodanig dat de stralingsproductie wordt versterkt. Een deel van die weerkaatste straling verlaat de buis door een lichtdoorlatende plek in de spiegel aan één kant van de buis. Deze straling beslaat een zeer nauw golflengtegebied. Omdat de parallelle, coherente en nagenoeg monochrome laserstraling beter kan worden gefocuseerd dan gewoon licht of infrarode straling van een heet lichaam, zijn zeer hoge energiedichtheden haalbaar.

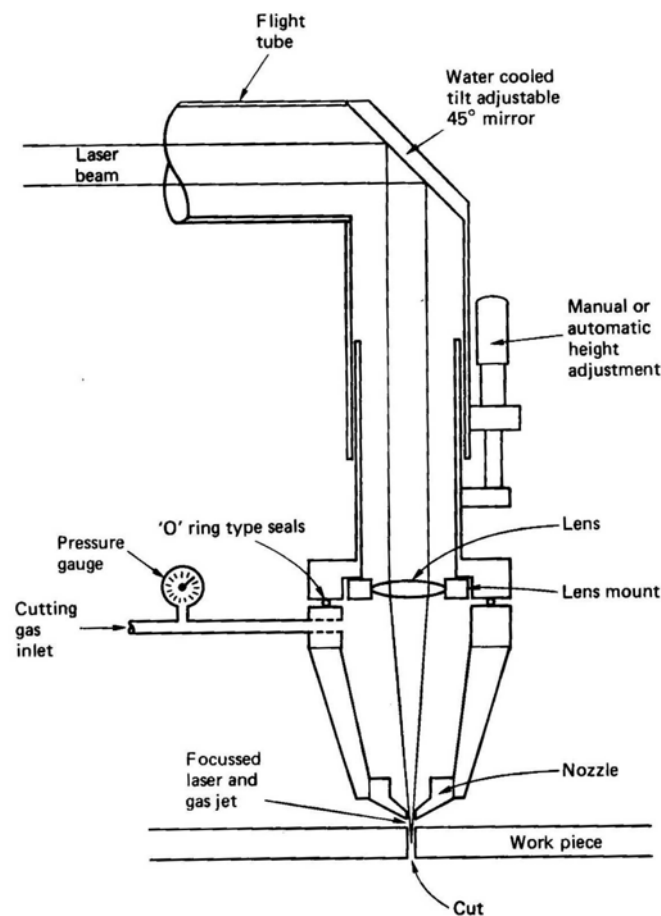
Lasers hebben uiteenlopende toepassing gevonden in onderzoek, de medische sector, defensie en de industrie. Het gebruik van lasers voor onkruidbestrijding is nog nauwelijks verkend (zie hoofdstuk 3.3). In onderzoek van Bayramian et al (1992), Couch en Gangstad (1974a, 1974b) en Long en Smith (1975) werden planten op een niet-snijdende wijze bestraald. Ander onderzoek met lasers heeft vooral een plantenfysiologisch karakter. Zo bestraalden Šebánek et al (1989) zaden en kleine planten met een kleine He-Ne laser (92 mW, 632.8 nm) om de effecten op opkomst en ontwikkeling en het niveau van plantehormonen en chlorofyl te onderzoeken.

Behalve het plaatselijk verhitten van weefsel zou ook de snijdende werking van lasers kunnen worden gebruikt voor onkruidbestrijdingstoepassingen. In tegenstelling tot mechanisch snijden wordt bij lasersnijden nauwelijks kracht op het voorwerp uitgeoefend, zodat dit niet stevig hoeft te worden ingeklemd. Dit is een belangrijke eigenschap voor onkruidbestrijdingstoepassingen. Verder produceren lasers weinig geluid en is er geen slijtage van bestrating of van de werkende elementen (zoals bij borstels). De straal is in principe snel bestuurbaar en focusseerbaar met CNC (Computer Numerical Control) spiegels en lenzen.

In de industrie worden lasers (vooral CO₂ maar ook Nd:YAG) gebruikt voor het snijden, graveren of lassen van (roestvrij)staal, non-ferro metalen, nylon, rubber, plastics, hout, glas, keramiek, textiel (Powell 1998). Een lens (gebruikelijke brandpuntsafstand 63.5 of 127 mm) focuseert de parallelle stralingsbundel op het te snijden voorwerp. De gemiddelde intensiteit van een 1000 W CO₂ laser bij een gebruikelijke spot-diameter van 0.3 mm is 1.4 MW/cm². De snijdende werking is niet zozeer te danken aan het hoge stralingsvermogen maar aan de extreem hoge energiedichtheid.

Het materiaal in deze kleine “hot spot” smelt, verdampt of ondergaat een chemische reactie (b.v. verbranding). Bij smelten of verdampen verandert alleen de fase (van vast naar vloeibaar of gas), terwijl een chemische reactie de integriteit van het materiaal zelf verandert (b.v. afbreken van cellulose in hout). Vergeleken met smelten of verdampen is snijden door chemische degradatie een langzamer proces dat hogere temperaturen vergt. Het type proces is afhankelijk van het materiaal. (Powell 1998)

Het gesmolten materiaal of de verbrande resten worden weggeblazen door een luchtstroom (0.1 - 15 bar) uit een spuitstuk (0.8 - 2 mm diameter)(figuur 5.1). Bij het snijden van staal wordt vaak zuurstof gebruikt, omdat de (exotherme) oxidatiereactie het snijproces aanzienlijk versnelt. Een negatief effect van de gasstroom is echter de convectieve koeling.



Figuur 5.1 Schematische voorstelling van een snijdende laser (Powell 1998).

Tabel 5.1 geeft voor een aantal materialen en CO₂ laservermogens de behaalde snijsnelheden. Dit zijn slechts globale richtlijnen omdat de kwaliteit van de straal en het laservermogen in de laatste 10 jaar sterk zijn verbeterd (Powell 1998). Er zijn geen publikaties bekend die snijsnelheden en

benodigde vermogens voor planten aangeven. Het is ook niet duidelijk met welk materiaal uit tabel 5.1 planten het meest vergelijkbaar zijn.

Naarmate het te snijden voorwerp de laserstraling beter absorbeert, is het snijproces efficiënter. Omdat het water in planten de straling van 10.6 μm goed absorbeert, zijn CO₂ lasers waarschijnlijk geschikt voor het afsnijden van onkruid. De hoge warmtecapaciteit van water en het ontbreken van een exotherm verbrandingsproces (zoals bij staal) beperken de snijsnelheid.

Tabel 5.2 Globale richtlijnen voor snijsnelheden van CO₂ lasers voor een aantal materialen (Powell 1998).

Snijnsnelheden voor staal zijn erg afhankelijk van de zuiverheid van het zuurstofgas. Snijnsnelheden voor hout zijn variabel en nemen af met toenemend vochtgehalte (hier 12%).

Materiaal	dikte (mm)	laservermogen (W)	snijnsnelheid (m/min)
Glas	3	500	0.5
Keramische tegels	6.3	1200	0.6
Hout - Populier	10	500	5.0
Hout - Eik	10	500	2.9
Hardboard	3	500	10.0
Golfkarton	3	500	25.0
Papier	0.1	500	≥ 500
PVC	10	500	1.2
Staal	4	500	1.1
Staal	1	500	5.0

In de industrie worden CO₂ lasers het meest gebruikt vanwege hun groot vermogen (gangbaar 50 - 2000 W) en efficiënte stralingsproductie (10 - 25%). Nd:YAG lasers (Neodymium: Ytrium Aluminium Garnet) hebben een kleiner vermogen (gangbaar 50 - 400 W) en een lagere efficiëntie (1-3%). Een pulserende 400 W Nd:YAG laser kan bij een puls-frequentie tot 500 Hz een puls-piekvermogen van 5-6 kW realiseren (Powell 1998). De geproduceerde golflengte (1.06 μm) wordt echter slecht door planten geabsorbeerd.

De kleinere golflengte van Nd:YAG lasers (1.06 μm) heeft echter belangrijke voordelen. In plaats van dure lenzen van zinkselenide bij CO₂ lasers kunnen goedkopere glazen lenzen met betere optische eigenschappen worden gebruikt. Omdat straling van 1.06 μm door glasvezels kan worden geleid, hoeft de laser bovendien niet op een kwetsbare of kleine plaats te worden opgesteld. (Powell 1998).

De golflengte van de laserstraling is afhankelijk van de aangeslagen stof. Ook de vermogens en de stralingsproductie-efficiëntie lopen sterk uiteen (Tabel 5.2). Svelto (1989) geeft een overzicht van de verschillende typen lasers en hun werkingsprincipe.

Tabel 5.2 Overzicht van de golflengte, vermogen en efficiëntie van een aantal typen lasers met een continue straal (boven) en een pulserende straal (onder). (naar Svelto 1989).

Type, continu	golflengte (μm)	vermogen (W)	efficiëntie (%)		
Nd:YAG	1.064	200	1-3		
CO₂	10.6	$10^3 - 50 \times 10^3$	10 - 25		
HF	2.6 - 3.3	$10^4 - 10^6$			
GaAs	0.850	2	40		
FEL	$0.3 - 10^3$	- 100	1 - 10		

Type, pulserend	golflengte (μm)	vermogen (W)	efficiëntie (%)	piekvermogen (kW)	pulsduur
Nd:YAG	1.064	1000	1-3	10	1-5 ms
		10		2×10^4	10-20 ns
Cu	0.5105	40	1 - 2	100	20 - 40 ns (- 20 kHz)
CO₂(TEA)	10.6	10^3	10	10^4	0.1 - 0.5 μs
KrF	0.248	500	1	5×10^3	10 ns
Rhodamine 6G	0.590	100	0.5	100	10 μs
HF	2.6 - 3.3			10^3	

In dit rapport zijn slechts de mogelijke toepassingen van commercieel gebruikte CO₂ en Nd:YAG lasers kort verkend. Behalve deze hebben ook halfgeleider (diode) lasers (Double Heteroconjunction GaAs of InGaAsP) een brede toepassing gevonden (CD spelers, glaskabel-communicatie). Deze diodes hebben een lange levensduur (10^4 u) en zijn zeer efficiënt (ca. 40%, max 60%), maar in verband met interne beschadiging is het maximumvermogen van een enkele diode beperkt tot ca. 30-50 mW. Er zijn ook laser diode-arrays ontwikkeld waarbij de laserkanalen in fase zijn en zodanig dicht bij elkaar geplaatst dat een vermogen van 2W kan worden verkregen (Svelto 1989). De golflengte van GaAs (0.85 μm) wordt slecht door planten geabsorbeerd, maar er zijn ook andere diodelasers ontwikkeld met kleinere golflengten in het zichtbare bereik, die goed worden geabsorbeerd (GaInP of AlGaInP: 0.68 μm).

CO lasers produceren straling met golflengten van ca 5 μm , die goed door planten wordt geabsorbeerd, bij een zeer hoge stralingsefficiëntie (60% en meer) en vermogen (100 kW en meer). Echter, voor deze prestaties is een zeer lage temperatuur nodig (77-100 K), hetgeen de commerciële ontwikkeling belemmert. Er zijn ook CO lasers gemaakt die bij kamertemperatuur nog steeds een efficiëntie van 20-30% halen (Svelto 1989).

5.2 Oriënterend experiment

Als verkenning van de haalbare snijsnelheden is een oriënterend experiment uitgevoerd met een pulserende 600 W Nd:YAG en een pulserende 250 W CO₂ laser in het laserlab van TU Twente. Het blad van pollen volgroeid straatgras (*Poa annua* L.) van 5-8 cm hoog werd met een elastiek samengebonden, op een X-Y tafel geklemd en met een constante snelheid van 0.2 m/s door het brandpunt van een laserstraal bewogen. Ondanks het gigantische opgenomen elektrisch vermogen van 40 kW was de Nd:YAG laser niet tot snijden in staat. Bij 100 W laservermogen sneed de CO₂ laser grassprietten binnen een bereik van 1-1.5 cm in de richting van de straal (rondom het brandpunt) volledig af. Er is niet onderzocht of de lagere stralingintensiteit op grotere afstanden van het brandpunt een groeiremmend effect had. Verlaging van het laservermogen naar het minimum van 25 W gaf nagenoeg hetzelfde resultaat. Hierbij waren de vaatbundels aan de rand van de 1-1.5 cm brede strook niet geheel doorgesneden. Omdat verdere verlaging van het laservermogen niet mogelijk was kon de stralingsintensiteit waarbij snijden nog net mogelijk is niet worden vastgesteld.

Het kwantificeren van de mogelijke energiebesparing en capaciteitsverhoging door een gestuurde laserstraal is een moeilijk zaak, evenals een vergelijking met convectieve warmteoverdracht door (eventueel gerecirculeerde) hete lucht of stoom. Onkruidgrootte, -type en -bezettingsgraad spelen ongetwijfeld een grote rol, terwijl veel gegevens ontbreken. De onderstaande berekeningen geven daarom alleen een grove indicatie.

Mohsenin (1980) geeft voor vers spinazieblad met 7.3% drogestof een dichtheid van 0.22 g/cm³ en een soortelijke warmte van 3940 J kg⁻¹ K⁻¹. Als bij een sterke begroeiing 45% van de voeglenkte begroeid is (Sluijsmans en Hoksbergen 1992), is de begroeide voeglenkte bij stoeptegels (30 x 30 cm) 3.0 m². Stel dat een volledig met gras begroeide voeg zou overeenkomen met een verse biomassa van 40 g/m, dan vergt het volledig verhitten van dat onkruid van 15 °C tot 70 °C op 26 kJ/m². Als een 25W CO₂ laserstraal de onbegroeide stukken voeg zou overslaan, zou de capaciteit maximaal 240 m²/uur bedragen, bij een laserenergie van 375 J/m². Dit is 1.44% van de energie die benodigd is voor het verhitten van de gehele plant. Een machine met 16 perfect gestuurde laserstralen van 25 W (totaal 400 W laservermogen) zou een capaciteit van 3840 m²/uur kunnen halen, vergelijkbaar met de capaciteit van moderne branders (2000-6000 m²/uur, Medema 1997).

Bij een laserrendement van ca. 17%, 65% aggregaatrendement (gegevens Froment magnate 1998) en een specifiek brandstofverbruik van 0.34 l/kWh (60% belasting bij nominaal toerental, van Straelen

en de Maeyer 1997), zou het dieselvebruik bij laserstraal-snijden 0.943 ml per m² tegeloppervlak bedragen. Bij een bovenste verbrandingswaarde van diesel van 52.09 MJ/l (Sass et al 1974) komt dit overeen met 49.1 kJ/m². Moderne branders hebben een gasverbruik van 2.1-2.8 g/m² (Medema 1997), hetgeen overeenkomt met een energie-inhoud van 100-132 kJ/m². Onkruidsnijden met laser zou dus energetisch efficiënter kunnen zijn dan afbranden met moderne branders, terwijl een kleine motor (maximumvermogen 6 kW) volstaat.

Deze berekening gaat uit van een zeer nauwkeurige laserstraalbesturing met een verwaarloosbare overbruggingstijd tussen begroeide plaatsen, die bovendien hooguit 1 cm breed zijn. Bovendien is de vergelijking met verhitting van de gehele plant gebaseerd op één enkele meting van de snijsnelheid. De besturingstechniek is de sleutel tot het lage energiegebruik van de laser, want het "scannen" van het gehele oppervlak zou 31.4 ml diesel per m² (ofwel 1637 kJ/m²) vergen. De kosten van de laser met geavanceerde besturingstechniek en sensoren zullen waarschijnlijk de kosten van moderne branders verre overtreffen. Waarschijnlijk zullen ook de kwetsbaarheid en storingsgevoeligheid belangrijke nadelen zijn.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Algemeen

Lagere kosten per bestrijding, minder nadelige neveneffecten van bewerkingen (beschadiging van de verharding, lawaai, veiligheid, gebruik fossiele energie) en uitgekiende bestrijdingsregimes zijn de belangrijkste doelstellingen bij het aantrekkelijker maken van niet-chemische technieken voor onkruidbestrijding op verhardingen. Dit is vooral van belang als men uiteindelijk het herbicidegebruik verder wil terugdringen dan het niveau dat met nauwkeurige dosering en pleksgewijze toediening haalbaar is.

Hoewel onkruidbranders en borstelmachines de laatste jaren zijn verbeterd, lijkt een aanzienlijke verhoging van de capaciteit noodzakelijk voor het verlagen van de kostprijs per bestrijding. Verhoging van de effectiviteit lijkt nauwelijks mogelijk zolang uitsluitend de bovengrondse delen van onkruiden worden beschadigd. De daardoor benodigde herhaling van de bestrijding is een blijvend nadeel ten opzichte van chemische bestrijding met systemische middelen zoals glyfosaat.

De twee meest belovende sporen bij verdere verbetering van machines zijn het toepassen van sensoren en automatische besturing, en de ontwikkeling van betere mechanische en thermische werkingsprincipes.

In moderne spuiten voor verhardingen wordt onkruiddetectie reeds toegepast om alleen begroeide plekken te bespuiten. Hoewel sensoren en geavanceerde besturingstechnieken ook de capaciteit van niet-chemische onkruidbestrijdingsmachines kunnen verhogen, worden deze nog nauwelijks toegepast. Er zijn geen studies bekend die aangeven welke capaciteitswinst haalbaar is door niet-begroeide plekken over te slaan, de machine automatisch om obstakels te sturen of door meerder borstels of brander-eenheden tegelijk automatisch aan te sturen. Op basis van zulke studies zouden fabrikanten de verhouding tussen aanschafprijs van de machine, energiegebruik en capaciteit kunnen optimaliseren. Verder is nog niet duidelijk welke combinaties van capaciteit en prijs vereist zijn om een substantiële omschakeling naar niet-chemische methoden te bereiken.

6.2 Verbetering van branders

Hoewel het brandstofverbruik een relatief klein deel van de bestrijdingskosten bepaalt, is een verhoogde efficiëntie van de energie overdracht van belang bij het verbeteren van onkruidbranders, met het oog op de capaciteit en CO₂ uitstoot. Bestaand onderzoek biedt nog onvoldoende informatie om aan te kunnen geven in hoeverre de efficiëntie en capaciteit van onkruidbranders kan worden verhoogd binnen bestaande concepten. De modellen die in recent fundamenteel onderzoek (b.v.

Bertram 1996) zijn ontwikkeld bieden hiervoor echter perspectieven, maar zijn nog onvoldoende geparameteriseerd.

Goed opgezette, vergelijkende onkruidbestrijdingsexperimenten met infraroodstralers en afgedekte open branders zijn schaars. In vergelijkende experimenten met afgedekte open branders en infraroodstralers was de laatstgenoemde gelijkwaardig of slechts een beetje minder efficiënt.

Alle bestaande typen branders produceren zowel hete lucht als infrarode straling. Bestaande literatuur over onkruidbranders geeft echter onvoldoende inzicht in de hoeveelheid geproduceerde straling en benutting daarvan. Voor inzicht in de omvang van de warmtestromen zijn de volgende gegevens gewenst:

- De emissiecoëfficiënt en temperatuur van het stralend oppervlak (inclusief vlammen), eventueel afhankelijk van het gasdebiet en de gas / lucht verhouding.

- Het debiet en de temperatuur van de luchtstroom die de brander verlaat

- De emissiecoëfficiënt en temperatuur van verhitte brander-onderdelen.

Als infraroodbranders hoofdzakelijk energie overdragen door straling, is de maximumtemperatuur van de straler het meest bepalend voor de capaciteit. Berekeningen met een eenvoudig model duiden aan dat verhoging van de stralertemperatuur van 800 naar 1300°C de snelheid verhoogt van 0.1 naar 1.4 km/u. Verdere verhoging naar 1800°C zou een snelheid van 5.6 km/u mogelijk maken. Als de stralingsefficiëntie niet afhangt van de temperatuur zou het gasverbruik bij die temperaturen resp. 7.4, 7.9 en 9.3 g/m² bedragen. Omdat efficiëntiedaling veel kleiner is dan de capaciteitswinst, is een zo hoog mogelijke stralertemperatuur wenselijk. Omdat de convectieverliezen aan het stralerooppervlak bij lage stralertemperaturen relatief groot zijn, zal in werkelijkheid het gasverbruik per m² eerder afnemen dan toenemen (van 10.5 g/m² bij 800°C naar 7.4 g/m² bij 1300°C, met aannames genoemd bij figuur 4.6).

Omdat de snelheden en gasverbruiken in het bovenstaande voorbeeld afhankelijk zijn van de onkruidbezetting, de dodelijke stralingsdosis en aannames over energiestromen en efficiënties, zijn de absolute waarden niet vergelijkbaar met die van echte onkruidbranders. Deze hebben een werksnelheid tussen 3 en 5 km/u, een gasverbruik van 2.1 - 4.0 g/m² en een capaciteit tussen 2400 en 6000 m²/uur (Medema 1997). Hoewel deze waarden gunstiger zijn dan de modelberekeningen kunnen er pas conclusies worden getrokken over de rol van straling en convectie met betere informatie over de dodelijke stralingsdosis en de omvang van de warmtestromen.

Behalve automatische besturing lijkt het vergroten van het brandervermogen per meter werkbreedte de eerst aangewezen weg voor capaciteitsvergroting. Omdat het vermogen van industriële infraroodbranders beperkt is tot ca. 150-200 kW/m², bieden open branders met geïntensiveerde convectieve warmte-overdracht (stoom, geforceerde luchtstroom) wellicht het meeste perspectief.

Het ontwikkelen van gasgestookte infraroodstalers met stralende pijpen en elliptische reflectoren geeft mogelijk een betere benutting en richtbaarheid van de geproduceerde straling, waarbij ook de hete luchtstroom kan worden benut. Als dit met een goedkoop branderontwerp te realiseren is, zouden dergelijke stralende pijpen toegepast kunnen worden voor het bestrijden van onkruid in gewasrijen of smalle stroken.

Hoewel met elektrische infraroodstralers een grote vermogensdichtheid haalbaar is, zijn voor het opwekken van grote elektrische vermogens zware, luidruchtige motoren en generatoren nodig. Bij onkruidbestrijding op ballast van rails bieden elektrische stralers wellicht meer perspectief, waarbij de richtbaarheid van de straling en een mogelijk kleiner brandgevaar bijkomende voordelen zijn.

6.3 Energie overdracht op planten met infrarode straling

Bij het ontwikkelen van nieuwe of verbeterde werkingsprincipes voor thermische onkruiddoding dient het volgende te worden nagestreefd:

- Maximale opname van de aan planten toegediende energie;
- Minimale transformatieverliezen en restwarmte: een groter deel van de geproduceerde energie bij de plant brengen;
- Betere richtbaarheid van de warmtestroom op begroeide stroken (voegen), planten, of een klein deel van een plant (thermisch mes), zodat een groter deel van de straling in het gebied waar mogelijk planten aanwezig zijn wordt benut;
- Een hogere energiedichtheid van de warmtestroom.

In principe heeft infrarode straling op alle vier punten goede eigenschappen.

Planten absorberen zichtbaar licht (golflengte 0.4-0.7 μm) en infrarode straling met golflengten boven 2.4 μm het meest efficiënt (ca. 80% absorptie). Straling met golflengten rond 1.4 en 1.9 μm wordt ook redelijk (ca. 60%) door planten geabsorbeerd. Groen blad is vrijwel transparant voor straling tussen 0.75 en 1.3 μm golflengte.

Naarmate de straler heter is absorberen planten een kleiner deel van de uitgezonden straling (b.v. 80%, 67%, 54% en 40% voor maïs bij 800, 1300, 1800 en 2800°C). De intensiteit van de uitgezonden straling van een heet oppervlak neemt echter sterk toe (resp. 83, 372, 1102 en 5237 kW/m²).

Het focuseren van straling van een groot oppervlak met een relatief lage temperatuur zou niet alleen de overdrachts-efficiëntie verhogen maar tevens de voor doding benodigde energie kunnen verlagen. De relatie tussen stralingsintensiteit en de dodelijke stralingsenergie (bij gelijkblijvende golflengte) moet verder worden onderzocht.

Bestaande gegevens over de dodelijke stralingsdosis lopen zeer sterk uiteen. Omdat een groot deel van die variatie waarschijnlijk te wijten is aan de opzet van de experimenten, dient aan toekomstige experimenten een degelijke systeemanalyse ten grondslag te liggen, met aandacht voor plantgeometrie en de energiebalans van een plant.

Modelberekeningen duiden aan dat infrarode straling beter wordt benut naarmate de straler een groter oppervlak heeft en dicht bij het bestraalde oppervlak hangt. Een geringe hoogte stelt echter hoge eisen aan de nauwkeurigheid van de hoogte-instelling of hoogte-regeling en is moeilijk haalbaar bij groot onkruid, onregelmatige oppervlakken en de aanwezigheid van afval, takken of stenen. Een langer branderoppervlak verhoogt de mogelijke rijsnelheid maar beperkt de wendbaarheid.

Bij het beoordelen van de mogelijkheden voor betere benutting van straling en hete lucht en de gevolgen van aangepaste branderontwerpen voor de capaciteit en efficiëntie van onkruidbranders, zouden modellen voor warmte- en stralingproductie, stroming en warmte-overdracht erg nuttig zijn. Op basis van een model voor convectieve warmte-overdracht ontwikkelde Bertram (1996) een nieuwe branderconcept met gerecirculeerde vochtige lucht. Een betere uitwerking van straling en stroming in een dergelijk model is wenselijk. Parameterisatie van planten en het grondoppervlak is hierbij een knelpunt.

6.4 Lasers

Een grove verkenning geeft aan dat de in de industrie toegepaste CO₂ lasers onkruiden energetisch efficiënt zouden kunnen afsnijden als de laserstraal een hoge benuttingsgraad heeft. Om die hoge benuttingsgraad te bereiken zijn sensoren en besturingstechniek nodig. Het benodigd motorvermogen is erg laag. Deze conclusie dient te worden geverifieerd omdat ze gebaseerd is op één enkele snijsnelheidsmeting en diverse aannames.

Het is niet duidelijk welke stralingsintensiteit nodig is voor een snijdende werking bij uiteenlopende plantweefsels (levende, verhoude of verdroogde stengels, blad), en welke snijsnelheid haalbaar is. Ook dient te worden onderzocht of niet-snijdende stralingsdoses een groei remmende werking hebben.

Nd:YAG lasers zijn niet geschikt om onkruid te bestrijden omdat hun golflengte nauwelijks wordt geabsorbeerd.

Door de beperkte tijd zijn in dit rapport alleen de twee meest gangbare lasers (CO₂ en Nd:YAG) behandeld, terwijl bijvoorbeeld CO-, halfgeleider- en HF-lasers ook interessante mogelijkheden zouden kunnen bieden. Omdat bovendien de technische ontwikkelingen snel gaan is nadere studie naar de toepasbaarheid van lasers voor onkruidbestrijding aanbevelenswaardig. Aspecten zoals kosten, schokgevoeligheid, levensduur, afmetingen verdienen daarbij aandacht, evenals studie naar beschikbare optica en besturingssystemen.

Referenties

- Anderson, R.L.; Hansen, C.M.; Thomas, C.; Hull, J., 1967. *Flame for weed control - A progress report*. Proceedings fourth annual Symposium on thermal agriculture, sponsored by National LP-Gas association and Natural Gas Processors Association, Kansas City, Missouri, 22-25.
- Ascard, J., 1989. *Thermal weed control in seeded onions*. 30th Swedish crop protection conference. Weeds and weed control. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Reports Vol. 2: 35-50.
- Ascard, J., 1995a. *Thermal weed control by flaming: Biological and technical aspects*. Dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Alnarp, Report 200.
- Ascard, J., 1995b. Effects of flame weeding on weed species at different developmental stages. *Weed Research* 35: 5,397-411.
- 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.
- Bashford, L.L.; Batchelder, D.G.; Porterfield, J.G., 1972. Response of cotton plants to heat inputs. *Transactions of the ASAE*, 870-873.
- Batchelder, D.G.; Porterfield, J.G.; Taylor, W.T.; Moore, G.F., 1970. Thermal defoliator developments. *Transactions of the ASAE*, 782-784.
- Bayramian, A.; Fay, P.K.; Dyer, W.E.; Lym, R.G., 1992. *Weed control using carbon dioxide lasers*. Proceedings of the Western Society of Weed Science, Salt Lake City, Utah, USA 10-12 March 1992, Vol 45: 55-56.
- Bertram, A., 1996. *Geräte – und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung*. Dissertation. Institut für Landtechnik der Technischen Universität München, Weihenstephan, 195 pp.
- Bjorkman, O.; Biggins, J., 1987. High-irradiance stress in higher plants and interaction with other stress factors. *Progress in Photosynthesis Research* 4: 11-18.
- Björnberg, T., 1988. Electrical infrared drying - New drying method and practical experience. 1988 Coating Conference p 239-246.

- 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.
- Couch, R.W.; Gangstad, E.O., 1974a. The response of duckweed to laser radiation. *Hyacinth Control Journal* 12: 5, 25-26.
- Couch, R.W.; Gangstad, E.O., 1974b. Response of waterhyacinth to laser radiation. *Weed Science* 22: 5, 450-453.
- Daniell, J.W.; Chapell, W.E.; Couch, H.B., 1969. Effect of sublethal and lethal temperature on plant cells. *Plant Physiology* 44, 1684-1689.
- Duffy, G.G.; Walmsley, M.M.; Smith, T.M., 1983. The drying of paper webs using a new infrared generator. *Appita* 37 no. 2.
- Ellwanger, T.C. Jr.; Bingham, S.W.; Chapell, W.E., 1973a. Physiological effects of ultra-high temperatures on corn. *Weed science* 21, 296-299.
- Ellwanger, T.C. Jr.; Bingham, S.W.; Chapell, W.E.; Tolin, S.A., 1973b. Cytological effects of ultra-high temperatures on corn. *Weed science* 21, 299-303.
- Evin, F., 1992. *Optimizing efficiency of short wave infrared dryer*. Drying '92, 924-930.
- 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.
- Hansen, C.M., Snobar, B.; Chase, R.W., 1970. *Potato vine desiccation*. Proceedings seventh annual symposium on thermal agriculture, sponsored by National LP-Gas Association and Natural Gas Processors Association, Dallas, Texas. 10-13.
- Hege, H., 1989. *Thermische Unkrautbekämpfung im Gartenbau*. Institut für Technik im Gartenbau, Weihenstephan, Germany. 33 pp. (Unpublished report).
- Hoffmann, M., 1989. *Abflammtchnik*. KTBL-Schrift 331, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- 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", Dorschkamprapport 404, 57 pp.
- Hooper, A.W., 1977. *Estimation of the moisture content of grass from diffuse reflectance measurements at near-infrared wavelengths*. Departmental note (unpublished) AFRC Engineering, Silsoe.
- Horton, P.; Ruban, A.V.; Walters, R.G., 1996. Regulation of light harvesting in green plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 47: 655-684.

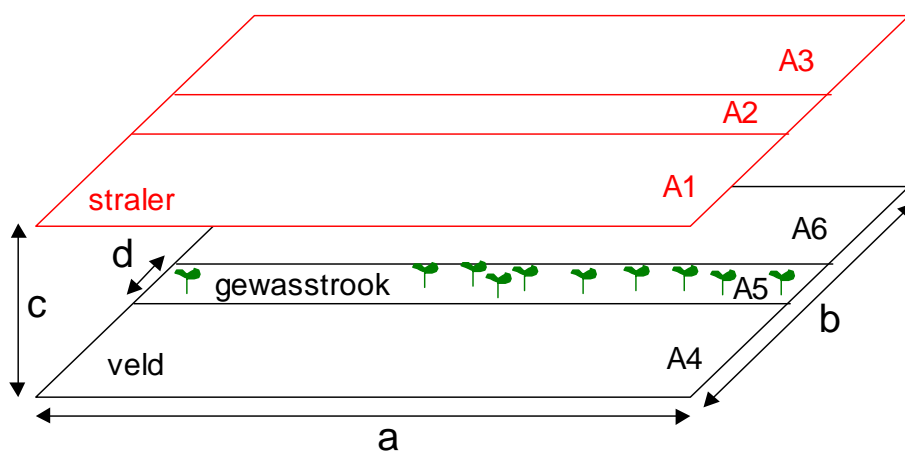
- Johansson, M., 1991. *Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare*. Department of Control and Maintenance, Malmö.
- Klooster, J.J., 1983. Thermische onkruidbestrijding, een interessant alternatief. *Landbouwmeechanisatie* 34: 8, 787-789.
- Krenin, E.V., 1990. *Moderne hocheffective Gasstrahlrohre - Theorie und Praxis*. Gas Wärme International 39.
- Krieger, D., 1992. Technische und wirtschaftliche Kriterien zum Einsatz von Gas-IR- Anlagen in der papiermaschine. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 23/24.
- Kurstjens, D.A.G., 1998. *Overzicht van mechanische en fysische technologie voor onkruidbestrijding. Inventarisatie en analyse, innovatiebehoefte, stand van kennis en onderzoeksvragen*. IMAG-DLO rapport 98-03, 103 pp, 212 refs.
- Lalor, W.F.; Buchelle, W.F., 1970. Effects of thermal exposure on the foliage of young corn and soybean plants. *Transactions of the ASAE*, 534-537.
- Levitt, J., 1980. *Responses of plants to environmental stresses. 2nd edition. Volume I. Chilling, freezing and high temperature stresses*. Academic Press, New York.
- Long, K.S.; Smith, P.A., 1975. Effects of CO₂ laser on water hyacinth growth. Technical Report, Aquatic Plant Control Program no. 11, 124 pp. Beschikbaar: NTIS No. AD-A018 866-4GI.
- Long, S.P.; Humphries, S.; Falkowski, P.G., 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology* 45: 633-662.
- Madsen, O.H., 1993. *Low-temperature heating*. Danish Gas Technology Center.
- Medema, W.J., 1997. Borstelen met branden wint terrein. *Tuin en Park Techniek* 4: 2, 18-21.
- Mohsenin, N.N., 1980. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. Gordon & Breach science publishers, New York. 405 pp.
- Mohsenin, N.N., 1984. *Electromagnetic radiation properties of food and agricultural products*. Gordon & Breach science publishers, New York. 673 pp.
- Monteith, J.L.; Unsworth, M.H., 1990. *Principles of environmental physics. 1: Biophysics*. 2nd edn. Chapman and Hall, New York.
- Netland, J.; Ballvoll, G.; Holmøy, R., 1994. Band spraying, selective flame weeding and hoeing in late winter cabbage, Part II. *Acta Horticulturae* 372, 235-243.
- 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.
- Pettersson, M., 1995. *Drying using infrared radiators*. A literature review. LUTKDH / (TKKA-7003) /1-64 / (1995), 64 pp.
- Porterfield, J.G.; Batchelder, D.G.; Bashford, L.; McLaughlin, G., 1971. *Two stage thermal defoliation*. Proceedings eight annual symposium on thermal agriculture, sponsored by National LP-Gas Association and Natural Gas Processors Association, Dallas, Texas. 32-34.
- Powell, J., 1998. CO₂ laser cutting, second edition. Springer, London. 248 pp.
- Rahkonen, J.; Vanhala, P., 1993. *Response of a mixed weed stand to flaming and the use of temperature measurements in predicting weed control efficiency*. In: Thomas, J.M. (ed) Non chemical weed control. Communications of the fourth international IFOAM conference, Dijon, France, p. 167-171.
- Ruiz, R.; Singh, S.N., 1992. *Enhanced infrared burner system*. International Gas Research Conference.
- Salmela, J.; Ojala, K.T., 1994. Improving the efficiency of infrared drying with side emitters. *CADDET Energy Efficiency Newsletter* No. 3/1994.
- Sass, F.; Bouché, Ch.; Leitner, A., 1974. *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, deel I*. 13e druk. Springer Verlag Heidelberg. 959 pp.
- Šebánek, J.; Králik, J.; Hudeová, M.; Klíčová, Š. et al., 1989. Growth and hormonal effects of laser on germination and rhizogenesis in plants. *Acta Sc. Nat. Brno* 23(9), 1-49.
- Senström, S., 1993. *Modelling energy efficiencies and gas radiation in gasheated IR-dryers*. LUTKDH / (TKKA-7016) / 1-40 / (1993).
- Sluijsmans, J.J.L.; Hoksbergen, F.T.J., 1992. *Praktijkonderzoek naar mogelijkheden voor thermische onkruidbestrijding op verhardingen in de gemeente Arnhem*. IBN-DLO Wageningen, Dorschkamprapport 674, 38 pp.
- Sparrow, E.M.; Cess, R.D., 1978. *Radiation heat transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, New York. 366 pp.
- Speyer, R.F.; Lin, W.Y.; Agarwal, G., 1996. Radiant efficiencies and performance considerations of commercially manufactured gas radiant burners. *Experimental Heat Transfer* 9, 213-245.

- Srivastava, A; Strasser, R.J., 1997. Constructive and destructive actions of light on the photosynthetic apparatus. *Journal of Scientific and Industrial Research* 56: 3, 133-148.
- Storeheier, K., 1991. *Termisk ugrasbekjempelse* (Thermal weed control). Agricultural University of Norway, Department of Agricultural Engineering, Ås, Norway. Doctor Scientarium Theses 1991:18. 135 pp.
- Storeheier, K., 1994. Basic investigations into flaming for weed control. *Acta Horticulturae* 372, 195-204.
- Storeheier, K., 1996. *Damp som energibaerer ved termisk ugrasbekjempelse*. Institutt for Tekniske Fag, Ås, Norway. ITF Rapoort 80/96. 15 pp.
- Straelen, B.C.P.M. van; Maeyer, E.E.A de, 1997. *Specifiek brandstofverbruik en vermogensbehoefte van trekkers*. IMAG-DLO rapport 97-10, 33 pp.
- Sutcliffe, J., 1977. *Plants and temperature*. The Institute of Biology's Studies in Biology no. 86, Edward Arnold, London. 57 pp.
- Svelto, O., 1989. Principles of lasers, 3rd edition, Plenum Press, New York, 494 pp.
- Thomas, C.H., 1964. *Technical aspects of flame weeding in Louisiana*. Proceedings first annual symposium, research on flame weed control, sponsored by Natural Gas Processors Association, Memphis, Tennessee. 28-33.
- Townsend, J.S.; Cenkowski, s.; Friesen-Fischer, M., 1995. *The thermal effects of high intensity infrared radiation on fresh lettuce leaves*. In: Kushawa, L; Serwatowski, R.; Brook, R. Harvest and postharvest technologies for fresh fruits and vegetables. Proceedings of an international conference. Guanajuato, Mexico. 268-275.
- Vester, J., 1990. *Flammebehandling, behandlingsintensitet og ukrudtseffekt* (Summary: Flame treatment - Intensity and effect on weeds) Nordic postgraduate course in plant production science. Eleventh course: Weeds and weed control, Garpenberg, Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 10, 1-17.
- 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, voor een gasgestookte IR-brander.

Gasgestookte IR-brander zoals gebruikt door Klooster (1983) en Ascard (1998) 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.



Figuur A1 Schematische voorstelling van een gasgestookte IR-straler boven een gewasstrook.

Sparrow en Cess geven een hoekfactor voor twee parallelle vlakken A_{123} en A_{456} (afmetingen $a \times b$, oppervlakte $A_1 + A_2 + A_3$) en onderlinge afstand c . $F_{A_{123}-A_{456}}$ is de fractie straling van A_{123} die wordt opgevangen door A_{456} .

$$F_{A_{123}-A_{456}} = \left(\ln \sqrt{\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}} + Y \sqrt{1+X^2} \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + X \sqrt{1+Y^2} \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} - Y \arctan Y - X \arctan X \right) / \frac{\pi XY}{2} \quad (A1)$$

$$\text{met } X = a/c \text{ en } Y = b/c$$

Als we deze formule willen gebruiken voor het berekenen van de fractie van de energie die van vlak A_{123} naar A_5 straalt, moet de energiestroom tussen vlakken A_1 t/m A_6 zodanig worden beschreven dat $F_{A_{123}-A_5}$ kan worden afgeleid:

$$A123 \times F_{A123-A5} = A123 \times F_{A123-A456}^* - A1 \times F_{A1-A6} - A2 \times F_{A2-A6} - A3 \times F_{A3-A6}^* - A1 \times F_{A1-A4}^* - A2 \times F_{A2-A4} - A3 \times F_{A3-A4} \quad (A2)$$

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

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

Door deze relaties te substitueren in formule A2 krijgt men:

$$A123 \times F_{A123-A5} = A123 \times F_{A123-A456}^* - 2A1 \times F_{A1-A6} - 2A1 \times F_{A3-A6}^* - 2A2 \times F_{A2-A6} \quad (A4)$$

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

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

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

$$F_{A123-A5} = \frac{A12 \times F_{A12-A45}^* - A1 \times F_{A1-A4}^*}{A123} \quad (A6)$$

Door de werkelijke afmetingen van A1, A12 en A123 in te vullen en FA12-A45 en FA1-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:

$$\text{relatieve stralingsintensiteit} = A5 \times (A12 \times F_{A12-A45}^* - A1 \times F_{A1-A4}^*) \quad (A7)$$