

# Toepassingsmogelijkheden van niet-chemische technieken voor onkruidbestrijding op verhardingen

G.D. Vermeulen  
R.P. van Zuydam  
D.A.G. Kurstjens



december 2002

Nota P 2002-91





---

# Toepassingsmogelijkheden van niet-chemische technieken voor onkruidbestrijding op verhardingen

G.D. Vermeulen  
R.P. van Zuydam  
D.A.G. Kurstjens

december 2002

Nota P 2002-91

© 2002  
Instituut voor Milieu- en Agritechniek (IMAG)  
Mansholtlaan 10-12, Postbus 43, 6700 AA Wageningen  
Telefoon 0317 – 476300  
Telefax 0317 – 425670  
[www.imag.wageningen-ur.nl](http://www.imag.wageningen-ur.nl)

Interne mededeling IMAG. Niets uit deze nota mag elders worden vermeld, of vermenigvuldigd op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van IMAG of de opdrachtgever. Bronvermelding zonder de feitelijke inhoud is evenwel toegestaan, op voorwaarde van de volledige vermelding van: auteursnaam, instituut en notanummer en de toevoeging: 'niet gepubliceerd'.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system of any nature, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying or otherwise, without the prior written permission of IMAG.



# Inhoudsopgave

Voorwoord .....	1
Samenvatting.....	3
1 Inleiding .....	9
2 Mechanische bestrijding .....	13
2.1 Beschadigen .....	13
2.1.1 Betreden en berijden .....	13
2.1.2 Vegen .....	15
2.2 Afsnijden .....	16
2.2.1 Borstelen .....	18
2.2.2 Waterstraalsnijden.....	20
2.3 Verharding bewerken.....	28
3 Thermische bestrijding .....	31
3.1 Verhitten van bovengrondse delen .....	32
3.1.1 Hete gassen (stootbranden).....	32
3.1.2 Infraroodstraling .....	35
3.1.3 Heet water en stoom .....	45
3.1.4 Contactoverdracht.....	48
3.1.5 Elektrocutie en elektroporatie.....	49
3.2 Verhitten van ondergrondse delen; magnetronstraling.....	51
3.3 Thermisch afsnijden.....	52
3.3.1 Gefocusseerde IR-straling .....	53
3.3.2 Laser.....	55
3.4 Verhitting van specifieke plantbestanddelen .....	57
3.4.1 Algemeen .....	57
3.4.2 UV-straling.....	57
3.5 Vergelijking toekomstig perspectief van verhittingsmethoden .....	59
3.5.1 Effectiviteit .....	59
3.5.2 Productiviteit.....	61
3.5.3 Rekenvoorbeeld .....	62
3.5.4 Productiviteitsvergelijking op vlakke verharding .....	63
3.5.5 Productiviteitsvergelijking rondom obstakels .....	64
4 Mogelijke methodieken voor plaatsspecifiek werken .....	67
5 Conclusies en aanbevelingen.....	71
6 Referenties .....	73
Bijlage 1 Samenvatting van criteriumgewijze beoordeling .....	78



# Voorwoord

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

Een verruiming van de mogelijkheden om onkruiden niet-chemisch te bestrijden draagt direct bij aan de vermindering van de afhankelijkheid en het gebruik van chemische middelen. Deze studie is een verkenning van de mogelijkheden van nieuwe technieken voor niet-chemische onkruidbestrijding op verhardingen, in vergelijking met het huidige branden en borstelen. Zonder volledigheid na te streven, in verband met de beschikbare tijd en de toegankelijkheid van bronnen, is systematisch nagegaan op welke wijze nieuwe technieken toegepast zouden kunnen worden en wat daarbij de vooruitzichten zijn wat betreft inzetbaarheid, bestrijdingseffectiviteit, productiviteit, energieverbruik, andere milieu- en neveneffecten, veiligheid en, globaal, ook de kosten. Het rapport geeft duidelijke aanwijzingen in welke richtingen door onderzoek en ontwikkeling verbetering van niet-chemische bestrijdingstechniek mag worden verwacht.





## Samenvatting

De overheid, het publiek, afvalwaterzuiveringen en waterleidingbedrijven vragen om vrijwillige beperking van het gebruik van herbiciden op verhardingen wordt gevraagd door. In een aantal gemeenten wordt al niet-chemisch beheer toegepast. In veel gemeenten is echter nog onvoldoende draagvlak. Als redenen voor het continueren van chemisch beheer worden vaak genoemd de 3-5 keer hogere kosten van niet-chemisch beheer, het doorgaans groenere straatbeeld en twijfel over de milieuwinst in verband met het hogere energieverbruik en soms ongewenste neveneffecten. Achterliggende oorzaken voor de bovengenoemde knelpunten, zijn:

- Lage effectiviteit van onkruiddoding (alleen bovengrondse delen), waardoor de verharding kort na de bestrijding weer groen is: 3-5 werkgangen per jaar zijn nodig om een aanvaardbaar straatbeeld te verkrijgen;
- Lage arbeidsproductiviteit in vergelijking met chemische bestrijding;
- Relatief veel plekken onbereikbaar voor borstelmachines en branders. Bestrijding rond obstakels en op andere slecht bereikbare plaatsen met bosmaaiers of handbranders kost erg veel tijd;
- Hoge organisatiebehoefte van het werk: meestal verschillende technieken en meerdere werkgangen nodig per bestrijdingsronde, grotere werkploegen en soms verminderde inzetmogelijkheden;
- Onveiligheid voor werkers en publiek en mogelijke schade aan objecten;
- Hoog energieverbruik van huidige borstelmachines, branders en heetwatermachines.

Het verminderen van het herbicidegebruik is een milieupolitieke afweging. Selectief spuiten is inmiddels gemeengoed geworden en verdere vermindering van het gebruik bij chemisch beheer lijkt zelfs nog mogelijk. Toch wordt gestreefd naar niet-chemisch beheer, al is het genoegzaam bekend dat de directe kosten en het energieverbruik bij niet-chemisch beheer flink hoger zijn. Het blijven vergelijken van nieuwe niet-chemische technieken met selectief spuiten is in deze context weinig vruchtbaar. De uitdaging zit hem in het verbeteren van de huidige niet-chemische technieken. Daarom is in dit rapport gekozen voor vergelijking van nieuwe technieken met de standaard niet-chemische technieken borstelen (voor verwijderen van onkruid) en stootbranden (voor beschadigen van onkruid).

Nadere analyse leert dat beheerders de lage bestrijdingseffectiviteit op het moment als gegeven beschouwen en prioriteit leggen bij het vergroten van de arbeidsproductiviteit, zowel op vlakke ondergrond als rond obstakels. Een nieuwe techniek mag als beter beoordeeld worden als er toch mogelijkheden zouden zijn om de bestrijdingseffectiviteit te verbeteren of als de productiviteit hoger is, zonder onveilige situaties, excessief energieverbruik of zeer hoge kosten.

Voor een aantal gebruikelijke en nieuwe, mogelijk geschikte, mechanisch/fysische principes voor onkruidbestrijding op verharding zijn de technische mogelijkheden nagegaan en is hun geschiktheid beoordeeld aan de hand van de verwachte bestrijdingseffectiviteit, productiviteit, milieueffecten (m.n. energieverbruik), inzetmogelijkheden, veiligheid en neveneffecten, en globale kosten (zie Bijlage 1). Er is onderscheid gemaakt tussen mechanische en thermische methoden en tussen beschadiging en verwijdering van het onkruid.

### *Mechanische beschadiging*

Het verschijnsel dat er minder onkruid groeit in looproutes op trottoirs of grasvelden en in rijsporen op ZOAB vluchtstroken en klinkerwegen geeft aan dat frequent betreden of berijden een effectieve manier is om onkruidgroei op verhardingen te onderdrukken. Kennelijk wordt kiemend onkruid effectief bestreden door kneuzing. Nader onderzoek naar dosis-effectrelaties bij zeer jong onkruid kan mogelijk leiden tot minder frequente, effectieve, agressieve berijdingssystemen (geremde banden, wrijfplaten) voor specifieke situaties zoals vluchtstroken en grote open terreinen. Mogelijk is de productiviteit hoog en het energieverbruik laag. Ook op dagelijks geveegde terreinen komt weinig onkruid voor. Toepassing specifiek voor onkruidbestrijding ligt niet voor de hand vanwege de onrealistisch hoge frequentie. Agressiever veegsystemen bestaan al in de vorm van borstelen.

### *Mechanische verwijdering*

Borstelen en opvegen is de standaard werkwijze voor mechanische verwijdering van onkruid op elementverharding. Borstelen is ongeschikt voor halfverharding. Vergeleken met stootbranden is de effectiviteit mogelijk iets hoger, de productiviteit ca 1,5 keer hoger en het fossiel energieverbruik ca 4 keer lager. Het grootste bezwaar van borstelen is de schade die het aan de verharding toebrengt in de vorm van slijtage en verzakkingen. Wanneer er veel onkruid staat en er grond op de verharding ligt is borstelen veel effectiever dan branden. De bosmaaier, uitgerust met dikke nylon draad of een staalborstel, wordt als alternatief voor de borstelmachine gebruikt. Hiermee wordt altijd pleksgewijs (selectief) gewerkt; alleen daar waar onkruid staat en alleen in de voeg. Met name rondom obstakels kan hiermee makkelijker gewerkt worden. De productiviteit van deze kleine machine is maar weinig lager, het energieverbruik een factor 4 lager en de schade aan de verharding beperkt. Dit lage energieverbruik mag toegeschreven worden aan het pleksgewijs en gericht op de voeg werken en is een aanwijzing dat de ontwikkeling van een hoge capaciteit borstelmachine die pleksgewijs werkt, perspectief biedt.

Een mogelijk alternatief voor borstelen is waterstraalsnijden gecombineerd met het opzuigen van materiaal en water. Dit principe wordt wel toegepast voor reiniging van ZOAB, maar ook de zogenaamde vuilfrees bij de hogedrukreiniger is een voorbeeld. Mogelijke voordelen van waterstraalsnijden kunnen zijn dat de bestrating niet slijt en dat met één werkgang per ronde volstaan kan worden. Een neveneffect kan zijn dat materiaal tussen de voegen uitgespoeld wordt. Naar schatting zal de productiviteit bij een werkbreedte van 100 cm vergelijkbaar zijn met de borstelmachine; het fossiel energieverbruik en de kosten per m<sup>2</sup> zullen echter veel hoger zijn. Mogelijk kan een handunit, aangesloten op een mobiele pomp met watervoorraad geschikt zijn voor verharding met veel obstakels.

Een idee voor mechanische verwijdering van onkruid op halfverharding is het machinaal opnemen, reinigen (zeven, lucht, water) en terugleggen van de halfverharding zoals grind. De effectiviteit hiervan is waarschijnlijk zeer goed en, omdat het mechanisch is en weinig frequent, de productiviteit en kosten op jaarbasis laag.

### *Thermische beschadiging*

Plantenweefsel sterft af als het verhit wordt tot ca 70°C. Voor verhitting zijn vele technieken bekend, gebaseerd op warmteoverdracht door geleiding (contact met heet voorwerp), convectie (contact met hete lucht of vloeistof), straling (zoals zonnewarmte) of door

warmteopwekking in de plant door er stroom doorheen te laten lopen. Bij alle technieken is voor het opwarmen een zekere behandeltime (verblijftijd in de machine) nodig, afhankelijk van de onkruidsituatie, de gekozen techniek (overdrachtsefficiëntie) en de intensiteit van de verhitting (dosis-effectrelatie). De verblijftijd wordt bepaald door de lengte van de verhittingselementen en de rijsnelheid. Meestal kan de werktuiglengte niet groter zijn dan 100 cm in verband met de noodzakelijke wendbaarheid en de afmetingen van stoepen. Daarmee is ook de rijsnelheid beperkt. Overigens moet ook de breedte beperkt blijven tot max. ca 100 cm en daarmee ook de productiviteit. Vanwege het belang van een hoge productiviteit is bij de verkenning in de eerste plaats gekeken naar de efficiëntie van de warmteoverdracht en het maximum haalbare vermogen per m<sup>2</sup> verhardingsoppervlak (vermogensdichtheid). Samenvattend waren de bevindingen:

**Stootbrander:** Warmteoverdracht vooral convectief, d.m.v. hete verbrandingsgassen (open vlam), deels (ca 15%) via infraroodstraling van de mee opgewarmde binnenkant van de kap. Onder de kap van een moderne brander kan een gemiddelde luchttemperatuur van 500-600°C gehaald worden bij een vermogensdichtheid van 250 kW/m<sup>2</sup>. De productiviteit varieert van 300-860 m<sup>2</sup>/h (praktijk). Verder opvoeren van vermogensdichtheid en luchttemperatuur lijkt mogelijk, maar stelt hogere eisen aan de hittebestendigheid van de constructie en betere controle van onder de kap uitkomende hete lucht (brandgevaar, randschade). Bij duidelijke plekken onkruid kan door pleksgewijs werken met een handbrander (direct vlamcontact) of een geavanceerd systeem waarschijnlijk een behoorlijke productiviteit en laag energieverbruik gehaald worden.

**Infraroodstraler:** Warmteoverdracht via absorptie van infraroodstraling, een deel ook convectief via opgewarmde lucht. Bij gasgestookte stralers is de praktisch haalbare stralertemperatuur ca 1.000°C bij een vermogensdichtheid van 250 kW/m<sup>2</sup>, waarvan ca 125 kW/m<sup>2</sup> als infraroodstraling beschikbaar komt en de rest als hete lucht. De warmteoverdrachtefficiëntie is bij proeven duidelijk minder gebleken dan bij de modernste stootbrander, resulterend in een lagere rijsnelheid en hoger energieverbruik. Pleksgewijs werken blijft wellicht interessant. Elektrische IR-stralers bereiken een temperatuur van ca 2.300°C, maar zijn buisvormig. Bij afbuiging van de straling naar een vlakke ondergrond blijft een stralingsintensiteit van ca 25-35 kW/m<sup>2</sup> over. Dit en het energieverlies (ca 70%) bij omzetting van diesel naar elektriciteit maken elektrische stralers geheel ongeschikt.

**Stomen:** Warmteoverdracht convectief via heet water (ca 100°C). De beschikbare cijfers voor energieverbruik en productiviteit hebben betrekking op pleksgewijs werken met relatief kleine stoomkappen. Bij grotere kappen zal de productiviteit verder toenemen maar waarschijnlijk niet hoger kunnen worden dan bij stootbranden. Het energieverbruik zal ook toenemen tot naar schatting een factor 2 hoger dan bij stootbranden. Globale kostenindicatie grotere units: factor 3 hoger dan stootbranden.

**Strijken:** Over warmteoverdracht via een vast voorwerp (bijv. stalen rol of sleepplaat) op onkruid is niets bekend. Ideeën zijn om de restwarmte van de stootbrander te gebruiken om stalen rollen te verhitten of om een stalen rol van binnen uit te verwarmen. Een gunstig effect zou kunnen zijn dat het onkruid geplet wordt, zodat vooral dikkere plantdelen en groeipunten intensiever verhit worden.

**Elektrocutie:** Warmteoverdracht door opwekking van een elektrische stroom in onkruidplanten; bovengrondse plantendelen worden aangeraakt door een elektrode onder

hoge spanning, waardoor in de plant een stroom naar aarde gaat lopen en de plant verhit wordt. Onduidelijk is of ook de plantenwortels verhit worden. Uit proeven voor landbouwtoepassing blijkt een redelijke bestrijdingseffectiviteit, hoge productiviteit en laag energieverbruik. De vermogenselektronica apparatuur is echter kostbaar. Aan een aantal veiligheidsvoorwaarden moet voldaan worden.

**Magnetronstraling:** Energieoverdracht door absorptie van elektromagnetische microgolven door het water in de plant. Bestrijding van onkruidwortels door indringing van de golven in de bodem is speculatief. Berekeningen geven aan dat het fossiel energieverbruik een factor 3 of meer hoger zal zijn dan bij stootbranden. De inzetmogelijkheden zijn zeer beperkt met name door de veiligheidseisen. Een vuistregel is dat de kosten van "magnetronverwarming" een factor vijf hoger zijn dan van traditionele verwarming.

**UV-straling:** Energieoverdracht door absorptie van UV-straling (golflengtegebied 100–380 nm) met name door het bladgroen. In theorie wordt slechts een deel van de plantmassa verhit, waardoor volgens Deens onderzoek zoveel energiebesparing mogelijk is, dat het fossiel energieverbruik zelfs bij 30% omzettingsrendement van diesel naar elektriciteit en conversie van 33% van de elektriciteit naar UV-straling lager is dan bij stootbranden. Bij een recente oriënterende proef met een UV-straler, werkend op 10 cm boven het onkruid, blijkt dit tegen te vallen; het fossiel energieverbruik was bij gelijkblijvend effect ongeveer 1,5-2 keer hoger dan bij stootbranden. De productiviteit zou ongeveer gelijk kunnen zijn aan stootbranden. Een belangrijk aandachtspunt is afscherming omdat UV-licht "lasogen" veroorzaakt.

#### *Thermisch doorsnijden*

Een nog theoretische mogelijkheid om onkruid bij het oppervlak af te snijden is door middel van gefocusseerde straling. Infraroodstraling en met name infraroodlaserstraling kunnen door middel van spiegels of lenzen gefocusseerd en gericht worden. De straling wordt dan zodanig afgebogen wordt dat een puntvormig of lijnvormig brandpunt met een relatief hoge stralingsintensiteit ontstaat. Gehaalde snijsnelheden met gefocusseerde infraroodstraling (elektrische straler) en CO<sub>2</sub> lasers van 25 tot 50 W vermogen lagen in de orde van grootte van 1 tot 150 mm/s, te laag voor eventuele praktische toepassing. De hoeveelheid fossiele energie die nodig is om laserstraling op te wekken is hoog tot zeer hoog. Overigens is bij het beschikbaar komen van betaalbare infraroodlasers met een groter vermogen nog een lange technische weg te gaan om het onkruid te detecteren, de laserstraal te sturen en het gesneden materiaal af te voeren.

#### *Conclusies en aanbevelingen*

Uitgaande van vlakke verharding en een vergelijkbaar onkruidododingspercentage is met mechanische methoden een hoge arbeidsproductiviteit gekoppeld aan een laag energieverbruik mogelijk, vergeleken met thermische methoden. Waar mogelijk zijn daarom op vlakke verharding mechanische methoden te verkiezen boven thermische. Ten opzichte van de onkruidborstel bieden de volgende ideeën perspectief voor verbetering van de effectiviteit en de productiviteit met minder schade aan de verharding: 1) middelfrequent agressief berijden; 2) met kleinere borstels gericht op de voegen werken en dieper uitborstelen (op het zicht of met behulp van een voegherkenningsysteem), eventueel gecombineerd met pleksgewijs werken en 3) waterstraalsnijden.

Op kwetsbare verhardingen en halfverhardingen ligt toepassing van thermische methoden voor de hand. Een uitzondering geldt hier voor grind of een andere zeefbare verharding, waarvoor de ontwikkeling van een machine voor het opnemen, uitzeven en terugleggen wellicht een effectieve, goedkope oplossing kan bieden. Van de diverse thermische methoden op vlakke verharding kan met stootbranden potentieel de hoogste netto productiviteit gehaald worden. De overige technieken scoren allen lager, met name door lagere rendementen bij de conversie van brandstof naar benutte energie. Mogelijk bieden “strijken” (pletten en/of aanstrijken met een heet voorwerp) en “elektrocutie” mogelijkheden voor verbetering ten opzichte van stootbranden, mogelijk in combinatie met stootbranden. Diepgaander bestudering van de literatuur over elektrocutie is nodig. Bij thermische technieken is er uitzicht op productiviteitsverbetering en energiebesparing door gericht op de voegen en pleksgewijs te verhitten. Voor de openvlam en voor gebundelde IR- en UV-straling worden mogelijkheden voor verbetering gezien.

Voor de bestrijding van onkruid rondom obstakels wordt de (zeer lage) productiviteit vooral bepaald door de lage werkefficiëntie en niet in de eerste plaats door de relatief lage onkruidodingsnelheid, zoals op vlakke verharding. Dit komt onder meer omdat vaak voorzichtig (precies) te werk gegaan moet worden om schade te voorkomen, veel onkruidplekken niet met machines bereikt kunnen worden en de te behandelen plekken vaak op afstand van elkaar liggen (geen continu-werk mogelijk). Mogelijke technieken waarbij onkruid wel en obstakels niet beschadigd worden (voorkomen van precies werken) zijn vooral waterstraalsnijden (handunit met roterende nozzle, middelhoge druk) en heet water (evt. met schuimtoevoeging). Een andere aanpak is dat de machine zodanig uitgerust wordt dat snel en precies (zonder schade) werken mogelijk wordt. Opvoeren van de snelheid en de precisie is mogelijk door gebruikmaking van technieken met een hoge resolutie (bijv. kleine borstels, kleine vlam, gefocusseerde IR-straling, laser) gecombineerd met besturingsassistentie (variërend van eenvoudige zichtsysteemen tot geavanceerde targetmap- of sensorgestuurde robotarmen). De laatste optie kan eventueel in één machine gecombineerd worden met het al voorgestelde richten van borstels of verhittingsbronnen op de voegen op vlakke verharding.

Een aantal ideeën bieden perspectief voor productiviteitsverbetering en, in een enkel geval, de bestrijdingseffectiviteit. In samenwerking met machinefabrikanten, hoveniers en beheerders van verhardingen zal gekeken moeten worden naar het marktperspectief en de verdere ontwikkeling van deze ideeën.

Op het gebied van de bestrijdingseffectiviteit (dosis-respons curven en onkruidbeschadiging-hergroei relaties) van de diverse technieken onder uiteenlopende omstandigheden is nog onvoldoende bekend, met name op langere termijn. Deze kennis is belangrijk om richting te geven aan de ontwikkeling van effectieve technieken met een hoge jaarproductiviteit. Er wordt dan ook aanbevolen om hierover via onderzoek meer informatie te verkrijgen. Op grond van de uitgevoerde verkenning bieden de volgende ideeën perspectief voor verbetering van niet-chemische onkruidbestrijding op (half)verhardingen: agressief berijden, richten van borstels op voegen, waterstraalsnijden, opnemen en uitzeven van halfverharding, pleksgewijs werken met open vlam of beperkt gefocusseerde IR-straling, strijken, elektrocutie.



# 1 Inleiding

Ongewenste vegetatie ("onkruid") wordt veelal langs chemische weg bestreden door het bespuiten met herbiciden, zowel in de akker- en tuinbouw als op verhardingen en in het urbane gebied (plantsoenen e.d.). De maatschappelijke acceptatie van dergelijke bespuitingen, meer concreet het gebruik van chemische middelen, is echter dalende.

Producenten van akkerbouwproducten, groente en fruit spelen in op deze maatschappelijke trend door het gebruik van zgn. geïntegreerde en biologische teeltmethoden, waarin respectievelijk minder en geen chemische middelen worden gebruikt. Alternatieven voor chemische onkruidbestrijding kenmerken zich ten opzicht van chemische bestrijding in het algemeen door hoge(re) kosten, een grotere afhankelijkheid van weersomstandigheden en daarmee een verhoogd risico om de strijd met het onkruid te verliezen en, soms, een veel hoger energieverbruik. Oorzaken van hoge kosten kunnen zijn dat de bewerking zélf veel tijd kost (b.v. wieden) of dat de effectiviteit van de bewerking gering is zodat de bewerking vaak herhaald moet worden. Door de hoge arbeidskosten, het tekort aan beschikbare arbeidskrachten voor handwieden en de beperkingen die klimaat en bodem stellen aan de uitvoerbaarheid van de onkruidbestrijding, is de niet-chemische onkruidbestrijding een knelpunt geworden, met name in de bedrijfsvoering van biologische bedrijven. Onder andere dit knelpunt vormt een belemmering voor overschakeling van bedrijven naar een biologische teeltwijze en daarmee voor verdere terugdringing van het gebruik van herbiciden.

In overeenstemming met de maatschappelijke wens tot terugdringing van het gebruik van chemische middelen heeft de sector Openbaar Groen in 1997 afspraken met de rijksoverheid gemaakt. De afspraak was dat in 2000 het bestrijdingsmiddelengebruik in de sector met gemiddeld 43% en de emissie naar het oppervlaktewater met 90% verminderd zou zijn ten opzichte van de referentieperiode 1984-1988. Hoewel de volumedoelstelling voor de sector in z'n geheel in 1998 reeds gehaald was (IKC, 2000), was het gebruik op (half)verhardingen slechts met 6% afgenomen. In 1998 werd in Nederland totaal 32.340 kg werkzame stof op (half)verhardingen gebruikt, waarvan 76% door gemeenten, 18% door de NS en 6% door Provincies, Waterschappen, Rijkswaterstaat en Defensie samen. Omdat afspoeling van bestrijdingsmiddelen van verhardingen (indirect via riolering en overstort) één van de belangrijkste bronnen van emissie naar het oppervlaktewater is, wordt de emissiedoelstelling uit het MJP-G lang niet gehaald. Beperking van het gebruik van herbiciden op verhardingen wordt, naast door de publieke opinie, mede gevraagd door de afvalwaterzuiveringen, die na regen een piekafvoer van op verharding achtergebleven spuitmiddel moeten verwerken, hetgeen het biologische evenwicht in de waterzuiveringsinstallatie voor lange tijd kan ontwrichten. Ook waterleidingbedrijven hebben er groot belang bij dat het verbruik van spuitmiddelen sterk wordt verminderd omdat zuiveren van ingenomen oppervlaktewater zeer duur is als herbicidenresiduen aanwezig zijn.

Voor verdere (vrijwillige) vermindering van het gebruik van bestrijdingsmiddelen op (half)verhardingen door gemeenten worden er op organisatorisch/bestuurlijk niveau vaak drie knelpunten genoemd (Kortenhoff, 2001):

- Hoge kosten van gifvrij beheer (3 tot 5 keer hoger dan bij gebruik van chemicaliën; met name de laatste 10-25% reductie betekent een grote kostenpost);
- Achteruitgang van de netheid bij gifvrij beheer; niet-chemisch beheer levert doorgaans een groener straatbeeld op;

- Twijfel over de milieuwinst bij toepassing van alternatieven (niet-chemisch beheer kost veel meer energie en heeft soms ongewenste neveneffecten).

Desondanks lukt het in een aantal gemeenten om voldoende draagvlak en, daarmee, budget te krijgen voor niet-chemisch beheer. In veel gemeenten is echter nog onvoldoende draagvlak en in een aantal gevallen is men recentelijk zelfs weer overgegaan van niet-chemisch op chemisch of beperkt chemisch beheer. Oorzaken voor de bovengenoemde knelpunten, zijn:

- Lage effectiviteit van onkruiddoding (alleen bovengrondse delen), waardoor de verharding kort na de bestrijding weer groen is, zodat veel werkgangen per jaar nodig zijn om een aanvaardbaar straatbeeld te verkrijgen;
- Lage capaciteit, en daarmee een hoge arbeidsbehoefte, in vergelijking met chemische bestrijding (Tabel 1.1);
- Relatief veel plekken zijn onbereikbaar voor borstelmachines en branders. Voor het bestrijden van onkruid rond obstakels en op andere slecht bereikbare plaatsen wordt de bosmaaier wel toegepast;
- Hoge organisatiebehoefte van het werk (in de weg staande auto's, weersomstandigheden, timing, inzetmogelijkheden, vaak zijn diverse technieken en meerdere werkgangen nodig voor één bestrijdingsronde);
- Veiligheid voor werkers en publiek en mogelijke schade aan objecten;
- Hoog energieverbruik van borstelmachines, branders en heetwatermachines.

Andere dan de nu toegepaste technieken zijn wellicht toepasbaar te maken voor onkruidbestrijding op verharding en kunnen daarmee mogelijk een oplossing bieden voor bovengenoemde knelpunten. In 1998 verscheen een overzicht van mechanische en fysische technologie voor onkruidbestrijding, gericht op de agrarische sector (Kurstjens, 1998). In aanvulling hierop heeft het voorliggende rapport als doelstelling *het inventariseren van de mogelijkheden van niet-chemische technieken voor toepassing op verhardingen en het doen van aanbevelingen voor onderzoek gericht op het bereiken van doorbraken op het gebied van niet-chemische onkruidbestrijding op verhardingen*. Maatregelen voor onkruidpreventie blijven in dit rapport buiten beschouwing.

Tabel 1.1 Capaciteit en kosten van een aantal onkruidbestrijdingstechnieken op verharding (Hoksbergen, 2000; van Geffen *et al.*, 2001).

Methode	Capaciteit *) (m <sup>2</sup> /uur)	Kosten (€/m <sup>2</sup> )	Bijkomende kosten (€/m <sup>2</sup> )
Borstelen	430 - 1.500	0,03 - 0,11	0,05 (vegen/afvoeren)
Maaien (bosmaaier)	270 - 1.000	0,03 - 0,10	
Branden (stootbrander)	300 - 860	0,03 - 0,07	
Heet water	110 - 450	0,17 - 0,68	
Chemisch (SelectSpray, 1,20 m werkbreedte)	2.300 - 4.600	0,01 - 0,03	

\*) afhankelijk van onkruidsituatie, soort verharding en aanwezigheid van obstakels



Teruggrijpend op de bestuurlijk/organisatorische knelpunten en de oorzaken daarvan, worden mogelijkheden en beperkingen van mogelijk toepasbare niet-chemische technieken in de hoofdstukken 2 en 3 besproken aan de hand van de volgende aspecten:

- Technische mogelijkheden c.q. beschikbare/ontwikkelbare apparatuur; dosis-range, resolutie, soort energie voor de opwekking, geschiktheid van apparatuur voor mobiele toepassing (afmetingen, gewicht, stootgevoeligheid);
- Bestrijdingseffectiviteit; dosis-bestrijdingseffect relaties;
- Inzetmogelijkheden; klimaat, soort verharding, obstakels;
- Productiviteit van mogelijke uitvoeringsvormen, netto en bruto;
- Milieu; energieverbruik, verbruik van andere inputs, in het milieu terecht komende stoffen;
- Veiligheid/neveneffecten; veiligheid voor de mens, mogelijk schadelijke effecten op verharding en objecten en andere neveneffecten;
- Kosten; indicatie van kosten per m<sup>2</sup>.

Borstelen en stootbranden worden op verhardingen al veel gebruikt en worden daarom niet als nieuwe principes beschouwd, maar wel als referentie meegenomen ter beoordeling van nieuwe, mogelijk bruikbare technieken.

Omdat bestrijding op verharding uitgevoerd wordt met zelfrijdende, getrokken of geduwde apparatuur wordt de energie voor bestrijding verkregen door omzetting van fossiele brandstoffen naar de gebruikte energievorm. Bij schattingen van het energieverbruik dient dan ook rekening gehouden te worden met het verwachte rendement van zowel energieomzettingen als van de energieoverdracht op de planten. In dit rapport wordt de hoeveelheid verbruikte fossiele energie per behandelde oppervlakte-eenheid (in kJ/m<sup>2</sup>) gebruikt als vergelijkingsbasis voor verschillende methoden. Onderscheid wordt gemaakt tussen het netto energieverbruik, gebaseerd op rijsnelheid en werkbreedte, en het bruto energieverbruik waarbij ook het verbruik tijdens keren, wenden en pauzes, het extra verbruik wegens overlapping van bewerkte oppervlakten en het “overdoen” of langzamer rijden bij plekken met dicht onkruid ingecalculleerd is.

Evenals bij chemische bestrijding kan ook bij mechanische en thermische bestrijding gedacht worden aan pleksgewijze behandeling, met name om het energieverbruik terug te dringen en wellicht om de capaciteit te vergroten. Randvoorwaarde voor toepassing van pleksgewijze behandeling is dat bepaald wordt waar wel en niet behandeld moet worden en eventueel ook waar meer en minder behandeld moet worden. In hoofdstuk 4 wordt kort ingegaan op de huidige stand van zaken van detectie van onkruid op verhardingen.

Na samenvatting, overweging van sterke en zwakke punten van nieuwe bestrijdingstechnieken en prioriteitstelling van de verschillende aspecten worden conclusies getrokken en aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan in hoofdstuk 5.



## 2 Mechanische bestrijding

### 2.1 Beschadigen

Onder beschadiging of kneuzing verstaan we het mechanisch uitoefenen van een kracht op plantendelen zodat een deel van de cellen wordt samengedrukt of afgeschoven en daardoor openbarst. Door beschadigingen wordt het water- en voedingsstoffentransport binnen de plant ontregeld en wordt de groei geremd of treedt afsterving op. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de mogelijkheden om plantbeschadiging door betreden of berijden en vegen in te zetten als onkruidbestrijdingsmaatregel. In het algemeen geldt dat de relatie tussen de "intensiteit" van de behandeling, dan wel de mate van kneuzing en de groeiremming c.q. de afsterving van onkruiden op verhardingen niet is onderzocht. Mogelijke methoden om de mate van beschadiging te meten zijn de stijging van de bladtemperatuur (meting met IR-laser; pers. med. J. Tullberg, 2000), de geleidbaarheid van water waarin de beschadigde plantendelen gespoeld zijn en het droogverloop van de beschadigde planten (Kasper & Bosma, 1995).

#### *2.1.1 Betreden en berijden*

Het verschijnsel dat er minder onkruid groeit op looproutes op trottoirs of grasvelden en op rijsporen op vluchtstroken en klinkerwegen geeft aan dat betreden en berijden een effectieve manier kan zijn om onkruidgroei op verhardingen te onderdrukken. In beide gevallen wordt de bestrijding alleen bereikt als de loop- of berijdingsfrequentie hoog genoeg is.

Voor zover bekend wordt het regelmatig betreden / berijden van verhardingen wel passief, door verwijdering van weinig belopen en bereden verharding, maar niet actief ingezet als onkruidbestrijdingsmaatregel. Als het onkruid staat op goed bereikbare plaatsen, die met een relatief hoge snelheid kunnen bereden, biedt regelmatig berijden wellicht goede bestrijdingsmogelijkheden. Rijkswaterstaat zou bijvoorbeeld bij elke inspectie van haar snelwegen en fietspaden een aanhanger kunnen meetrekken die de vluchtstrook of het fietspad over de volledige breedte walst. Deze methode zou ook in aanmerking kunnen komen voor grote industrieterreinen (containeroverslagplaatsen), vliegvelden en parkeerplaatsen die regelmatig (nagenoeg) ontruimd worden. Als het onkruid op slecht bereikbare plaatsen staat, zoals rondom straatmeubilair, ligt actieve berijding als bestrijdingsmethode minder voor de hand.

Voor mogelijke toepassing van actieve berijding als bestrijdingsmethode is kennis van de samenhang tussen berijdingsfrequentie en intensiteit per berijding enerzijds en het onkruidbestrijdend effect anderzijds noodzakelijk. Mogelijke informatiebronnen voor de samenhang tussen de loop- of berijdingsfrequentie en het onkruidbestrijdend effect zijn gemeenten en Rijkswaterstaat. Deze bronnen werden in deze verkennende studie niet aangeboord. De normale intensiteit per betreding is voor een lopende persoon van 75 kg met schoenmaat 42 uit te drukken als een gemiddelde contactdruk van ca 35-400 kPa, afhankelijk van de grootte van het werkelijke raakvlak van de schoen. De gemiddelde contactdruk van banden van personenauto's is iets hoger dan de bandspanning en ligt tussen 100 en 400 kPa. De druk die een plant plaatselijk ondervindt kan vele malen hoger zijn door piekdrukken, veroorzaakt door bijvoorbeeld het zoolprofiel, het bandenprofiel of door ruwheid van de verharding. Anderzijds kan de plaatselijke druk veel kleiner zijn als de plant zich in een holte, zoals in een voeg tussen tegels, of op een flexibel oppervlak zoals grond, bevindt. Door de

vervorming van een band en door het afrollen en draaien van een voet ontstaan ook wrijvingskrachten. Deze kunnen maximaal even groot zijn als de normaaldruk. Vanwege het bovenstaande zijn de berijdingsfrequentie, de ophanging van de wielen, het profiel van de banden, het gewicht van de bandenwals en de vlakheid van de verharding belangrijke technische aandachtspunten bij mogelijke toepassing van berijding als onkruidbestrijdingsmaatregel.

Mogelijke andere effecten van betreden of berijden zijn:

- Het ten opzichte van elkaar bewegen van aangrenzende tegels en stenen waardoor het wortelstelsel zou kunnen worden gestoord;
- Snelle stroming van lucht of water door voegen tussen tegels of in ZOAB waardoor de vestiging van onkruid gehinderd zou kunnen worden.

Nader onderzoek naar de samenhang tussen de frequentie van betreding/berijding van wegen en paden, de intensiteit per betreding/berijding en het bestrijdingseffect kan mogelijk leiden tot effectieve, agressieve berijdingssystemen. Gedacht kan worden aan bandenwalsen die de oppervlakte goed volgen, en die al dan niet geremd of aangedreven worden teneinde het grondcontact te intensiveren. Schurende elementen zoals wrijfplaten zouden mogelijk gemonteerd kunnen worden en het bewerkingseffect vergroten. Het werken met een dergelijk apparaat, al dan niet met veegborstels om losgemaakte delen te verwijderen, zou indien mogelijk gecombineerd moeten worden met andere werkzaamheden, zoals rijbaaninspectie, zodat de behandeling relatief weinig arbeid vraagt.

De technische mogelijkheden om een volvelds berijdingssysteem voor onkruidbestrijding te ontwikkelen zijn vrijwel onbeperkt gezien de immense keuze aan banden, wielophangingen en aandrijvingen in de transportsector.

## Betreden/berijden: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

Onbeperkte mogelijkheden om normaaldruk en wrijving te realiseren met banden, wrijfplaten *etc.*, volvelds of in stroken vanaf ca 5 cm breedte. Pleksgewijze behandeling ligt niet voor de hand. Apparatuur is mobiel.

### Bestrijdingseffectiviteit

Frequent belopen of bereden oppervlak is in de praktijk het jaar rond onkruidvrij. Samenhang tussen berijdingsfrequentie, intensiteit per behandeling en bestrijdingseffect vereist nader onderzoek.

### Inzetmogelijkheden

Inzet op wegen en paden is het gehele jaar mogelijk, eventueel gecombineerd met vegen en/of weginspectie. Inzet direct voor of na zout strooien is mogelijk extra effectief.

### Productiviteit

Zeer hoge netto productiviteit per berijding (auto + bandenrol) is mogelijk (geschat op 35.000 m<sup>2</sup>/h). Bij een geschatte werkefficiëntie van 50% is de bruto productiviteit per berijding 17.500 m<sup>2</sup>/h. De benodigde intensiteit per bewerking en berijdingsfrequentie zijn onderwerp van onderzoek.

### Milieu

De energiebehoefte per berijding is zeer laag (geschat op 1 kJ/m<sup>2</sup>). Bij toepassing van een actief wrijvend effect (bijv. slip) neemt de energiebehoefte per bewerking aanzienlijk toe. De bandenslijtage per bewerking is te verwaarlozen tenzij actieve wrijving toegepast wordt. In het laatste geval komt er enig slijpsel van het toegepaste materiaal in het milieu terecht.

### Veiligheid/neveneffecten

Bij in acht name van de veiligheidsvoorschriften bij wegwerkzaamheden is de methode veilig.

### Kosten

Bij een uurtarief van € 30,00 worden de kosten per berijding geschat op 0,0017 €/m<sup>2</sup>.

### 2.1.2 Vegen

Binnen de werkpakketten voor het onderhoud van verhardingen is het vegen bedoeld om grond, zwerfvuil en onkruid, dat bij het borstelen op de verharding is komen te liggen, te verzamelen, op te nemen en af te voeren. In die zin is vegen een preventieve onkruidbestrijdende maatregel omdat onkruid zich makkelijk kan vestigen in grond die op de verharding ligt. Het vegen kan ook kneuzing van bovengrondse plantendelen veroorzaken. Waar bij betreding waarschijnlijk vooral de normaaldruk plantbeschadiging veroorzaakt, zouden de wrijvingskracht en de veelvuldigheid van de beroering bij het vegen effect teweeg kunnen brengen. De wrijvingskracht ontstaat wanneer het bewegende uiteinde van een veerkrachtige borstelhaar het plantweefsel op de verharding drukt of wanneer een borstelhaar langs een plant beweegt en de plant opzij drukt. In het laatste geval bepalen o.a. de voortbewegingssnelheid van de borstelhaar en de massatraagheid van de plant de wrijvingskracht. Het afzonderlijke effect van de kneuswerking van regelmatig vegen op de onkruidgroei is voor zover ons bekend, niet onderzocht. Uit de praktijk is echter wel bekend dat met alleen vegen het onkruid onvoldoende bestreden wordt.

## Vegen: mogelijkheden en beperkingen

### **Technische mogelijkheden**

Veegmachines zijn algemeen in gebruik. Aangenomen moet worden dat de borstels geoptimaliseerd zijn voor het opvegen van grond en vuil. Overwogen kan worden om de borstels stijver uit te voeren om de kneuswerking te verbeteren.

### **Bestrijdingseffectiviteit**

Voornamelijk preventief door wegnemen van vestigingsmogelijkheden voor onkruid. Effectiviteit bij hardere borstelharen zal altijd minder zijn dan de effectiviteit bij borstelen.

### **Inzetmogelijkheden**

Op vlakke verharding, in goten en beperkt rond obstakels.

### **Productiviteit**

Vergeleken met borstelen hoog.

### **Milieu**

Geen negatieve milieu-effecten.

### **Veiligheid/neveneffecten**

Veilig.

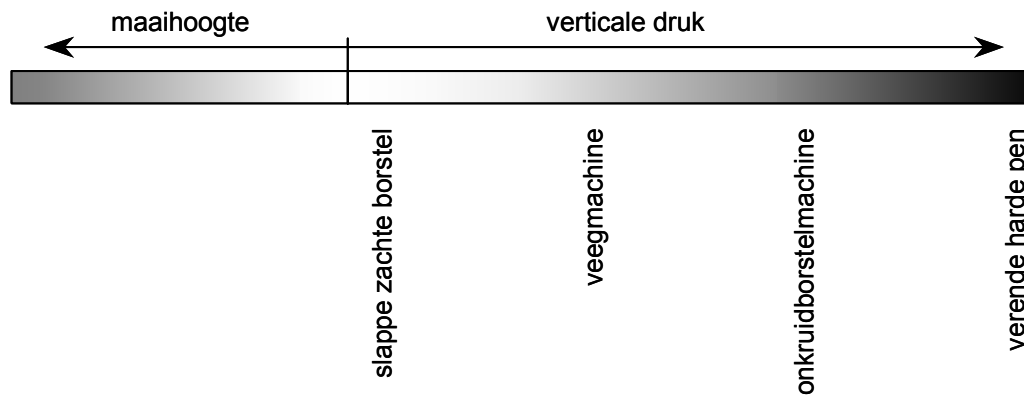
### **Kostenindicatie**

Per bewerking ca 0,05 €/m<sup>2</sup> (incl. afvoeren van vuil).

## 2.2 Afsnijden

Het werkingsprincipe mechanisch afsnijden van bovengrondse delen is enigszins verwant aan het vegen. Borstelen en vegen liggen beiden in een vloeiende schaal (Figuur 2.1), met als ene uiterste het vegen met een zeer zachte slappe borstel (vergelijkbaar met autowasserette) en als andere uiterste het uitschrappen van voegen tussen tegels met een harde pen. Als er geen sprake meer is van verticale druk op de verharding spreken we van maaien.

Een slappe zachte borstel wrijft plantendelen plat in de bewegingsrichting van de borstel en oefent daarna een relatief kleine trekkracht uit op een groot deel van het blad. Naarmate de borstel stugger wordt nemen die krachten toe en worden ze uitgeoefend op een kleiner gebied, dicht bij de grens tussen plant en verharding. Hoewel hierdoor de kans op het afrukken van plantendelen groter wordt, past de borstel zich minder aan het oppervlak aan. Daardoor zal het onkruid in Figuur 2.2 A ontwijken als de borstel naar links draait. Als de borstel naar rechts draait fungeert de uitstekende rand van de rechter steen als snijkant en wordt het onkruid afgesneden dan wel afgerukt. De stugheid van de borstel is dus een compromis tussen de grootte van de uitgeoefende krachten en de aanpassing aan onregelmatig oppervlak.



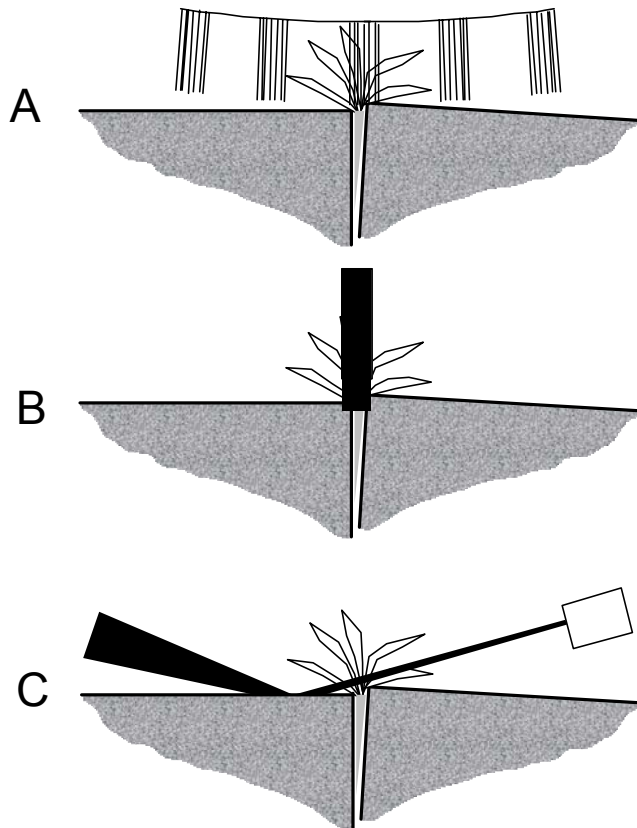
Figuur 2.1 Ordening van werkingsprincipes met toenemende verticale druk op de verharding. Bij de verticale streep in de schaal is de verticale druk juist nul.

Bij het hypothetische uiteinde van de schaal (de verende harde pen, Figuur 2.2 B) wordt op het grensvlak tussen plant en verharding een grote kracht uitgeoefend in verticale richting (op de verharding) als in horizontale richting (op de plant, loodrecht op het vlak van de tekening). De verticale kracht is nodig om de punt van de schrapende pen niet te laten uitwijken voor de plant. Omdat de druk op een zeer klein oppervlak wordt uitgeoefend en beide oppervlakken stijf zijn, moet de schrapende pen steeds beide stenen raken, zodat de plant niet kan ontwijken.

Bij het maaien wordt op een bepaalde hoogte boven het grondoppervlak een (voornamelijk horizontale) kracht uitgeoefend op de plant. De buigsterkte en de massastraagheid van de plant bepalen samen met de snelheid van het snijdend voorwerp (mes, klepel) of materiaal (water) hoe groot die kracht zal zijn. In veel gevallen kan alleen bij hoge snelheden een massastraagheidskracht ontstaan die groot genoeg is om het blad af te snijden of af te rukken.

Ervaringen bij het maaien van wegbermen met cyclomaaiers (met scherpe messen) en klepelmaaier (met botte klepels) geven aan dat door het ruwe uiteinde van de stoppels een aanzienlijke groeiremming kan optreden. Kneuzingen aan het resterende blad- of stengeloppervlak zouden ook een groeiremmend effect kunnen hebben. In de landbouw wordt maaien niet gezien als onkruidbestrijdingsmaatregel omdat het onkruid door het maaien slechts in zijn groei geremd wordt, terwijl er methoden zoals schoffelen toepasbaar zijn, waarbij de onkruidplanten gedood worden.

Met het oog op schade aan messen en klepels is maaien met enige werkbreedte in het algemeen niet toepasbaar op verhardingen, omdat die meestal niet geheel vlak liggen. Maaien tot zeer dicht bij de verharding wordt wel gedaan met de bosmaaier, uitgerust met nylon draad, vooral rond obstakels. Door toepassing van de nylon draad en het richten van het maai-element met de hand, wordt schade aan verharding en apparatuur voorkomen. Maaien of afsnijden is wellicht ook mogelijk met een snelle, coherente, hogedruk waterstraal; door het maken van een vrije snede of een gedwongen snede op het punt waar de straal een vast oppervlak raakt (Figuur 2.2 C). Voorts is contactloos, thermisch afsnijden mogelijk door middel van bijvoorbeeld laser en gefocusseerde IR-straling (§ 3.3).



Figuur 2.2 Schematische voorstelling van het borstelen (A), het wegschrapen van onkruid in een voeg met een harde verende pen (B) en waterstraalsnijden (C) op een verzakte bestrating.

### 2.2.1 Borstelen

In de praktijk worden onkruidborstelmachines al veel toegepast. De borstels op deze machines zijn staaldraadborstels, waarbij de stijfheid van de dunne staaldraden vergroot is door ze over het grootste deel van hun lengte in kabels samen te binden. Door de rafelende werking van het borstelen wordt aan het eind van de staalkabel een harde borstel gevormd. Bij slijtage van de staaldraden ontrafelt automatisch weer een stukje kabel, waardoor een vrijwel constante borstelstijfheid blijft bestaan.

De huidige onkruidborstelmachines hebben een hydraulisch bediende zwenkarm waaraan één hydraulisch aangedreven borstel is gemonteerd (Figuur 2.3). Vanuit de cabine kan de hoek van de vrijwel verticale draaias worden versteld, zodat een deel van de omtrek de grond raakt. Hoewel de borstel een diameter heeft tussen ca 25 en 75 cm, bedraagt de effectieve werkbreedte vaak niet meer dan ca 20 cm. De machine moet daardoor meerdere malen op en neer rijden om een bredere strook onkruidvrij te maken. Om onkruid bij ongelijk liggende verharding en obstakels te verwijderen moet zowel de zijwaartse positie als de hoek van de borstel worden veranderd, in combinatie met langzaam vooruit of achteruit rijden. Dit vraagt behendigheid en kost tijd. Stoepranden naast geparkeerde auto's zijn vaak matig bereikbaar. Andere nadelen zijn: borstelslijtage, schade aan verhardingen, beschadigingen aan auto's



door vliegende steentjes, splinters van borstelharen en lawaai. Tegen stofoverlast wordt indien nodig een kleine hoeveelheid water boven de borstels gesproeid. Na het borstelen is doorgaans een werkgang met de veegmachine nodig om grond en onkruid af te voeren. Dit werkt kostenverhogend. De borstelmachine is bij uitstek inzetbaar in situaties met achterstallig onderhoud zoals veel onkruidgroei en grond.

Op basis van de gegevens over de productiviteit en het dieselverbruik bij borstelen, van Hoksbergen (2000) en Geffen (2001), is berekend dat het energieverbruik bij borstelen van trottoir en klinkerverharding varieert van 120 kJ/m<sup>2</sup> bij lichte onkruidgroei tot 420 kJ/m<sup>2</sup> bij zware onkruidgroei en veel obstakels.

De bosmaaier, uitgerust met dikke nylon draad of een staalborstel, wordt als alternatief voor de borstelmachine en ook rondom obstakels gebruikt. Met de bosmaaier wordt altijd pleksgewijs (selectief) gewerkt; alleen daar waar onkruid staat en gericht op de voeg. De productiviteit van deze kleine machine is maar beperkt lager en het berekende energieverbruik is een factor 4 lager (30-110 kJ/m<sup>2</sup>) dan van de borstelmachine. De schade aan de verharding is beperkt. Het lage energieverbruik mag toegeschreven worden aan het pleksgewijs en gericht op de voeg werken en is een aanwijzing dat de ontwikkeling van een hoge capaciteit borstelmachine die automatisch pleksgewijs en gericht kan werken perspectief biedt voor verhoging van de productiviteit en verlaging van het energieverbruik. Te denken valt aan toepassing van meerdere gestuurde, kleine borstels.



Figuur 2.3 Onkruidborstelmachine ingezet op een "verlande" bestrating.

## Borstelen: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

In de praktijk bekend. Verbetering mogelijk als automatisch richten van borstels mogelijk wordt.

### Bestrijdingseffectiviteit

In de praktijk bekend. In deze studie gebruikt als referentie: normaal.

### Inzetmogelijkheden

Op verharding, zowel vlakke delen, in goten en rond obstakels.

### Productiviteit

430-1.500 m<sup>2</sup>/h, afhankelijk van de situatie. Bij automatische aansturing van meerdere borstels mogelijk hoger

### Milieu

Energieverbruik 120-420 kJ/m<sup>2</sup>; bij de bosmaaier 30-110 kJ/m<sup>2</sup>. Door slijtage van de borstels komt ijzer in het milieu.

### Veiligheid/neveneffecten

Schade mogelijk door vliegende steentjes en borstelsplinters en aanzienlijke slijtage van de verharding.

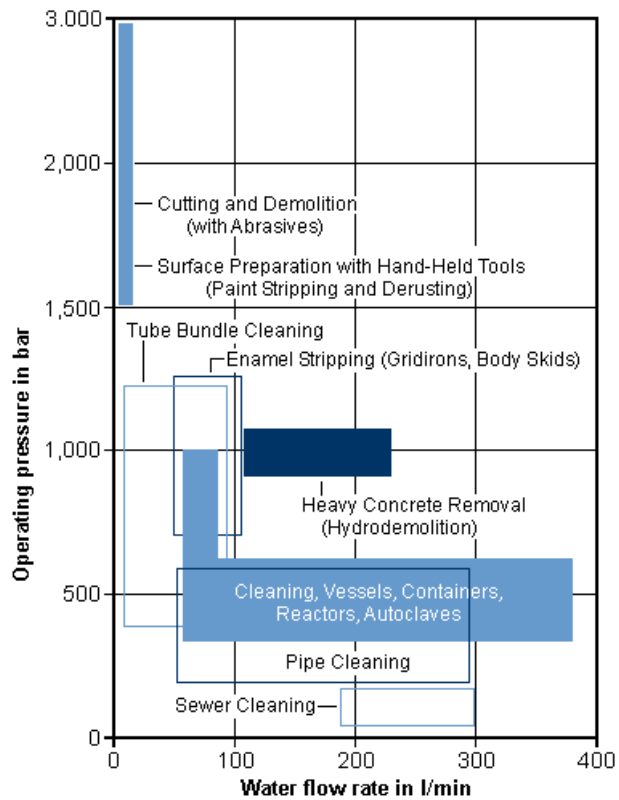
### Kosten

0,03-0,11 €/m<sup>2</sup>.

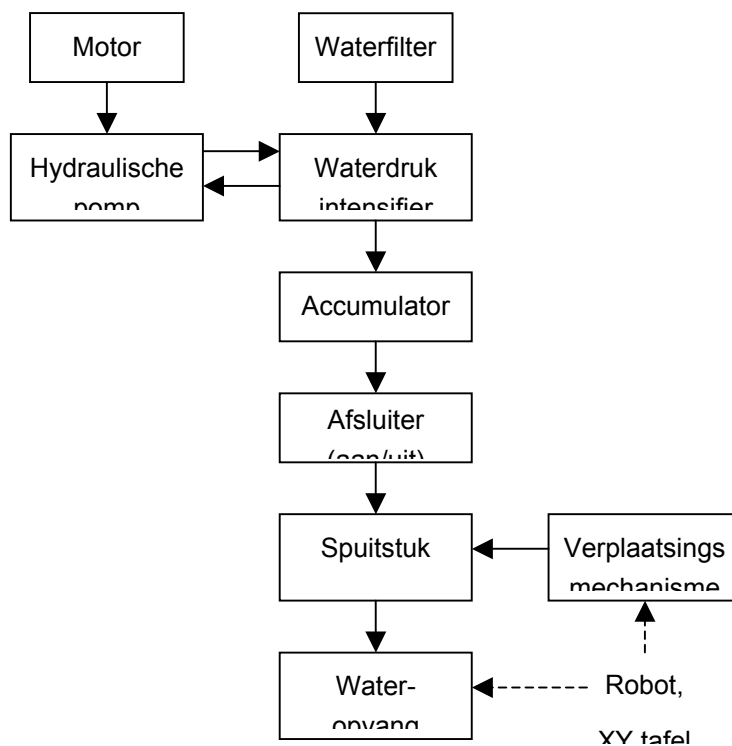
### 2.2.2 Waterstraalsnijden

Het spuiten van water onder hoge druk, al of niet in combinatie met grit, wordt in tal van toepassingen gebruikt, variërend van de bekende hogedrukreiniger voor huishoudelijk gebruik tot het snijden van harde materialen in de industrie (Figuur 2.3).

Het werkingsmechanisme van een industriële waterstraalsnijder is schematisch weergegeven in Figuur 2.4. Een hydraulische pomp drijft via een zgn. intensifier de druk van gefilterd water op tot maximaal ca 4.000 bar. De intensifier (Figuur 2.5) brengt de druk van hydraulische olie in een cilinder met een groot zuigeroppervlak over op water in een cilinder met een kleiner zuigeroppervlak. Meestal wordt een systeem met meerdere op en neer bewegende zuigers gebruikt, waarbij de waterdruk tot 20 maal hoger is dan de oliedruk. De accumulator vangt de door de intensifier veroorzaakte druk- en stroompieken op. In de spuitdop ondervindt de waterstraal altijd wrijving van de binnenkant van het spuitstuk, waardoor er een snelheidsverschil ontstaat tussen de binnen- en buitenkant van de straal. Daardoor is de straal op grotere afstanden van het spuitdop minder coherent. Op een afstand van 200-300 maal de straaldiameter valt de straal uiteen en neemt de snijcapaciteit af. Spuitdoppen met een scherpe opening zonder hals geven theoretisch de meest compacte stralen (Valco *et al.*, 1989). Bij het snijden van sla gaf de SDP spuitdop uit figuur 2.6 de meest coherente straal bij een lage vermogensbehoefte, terwijl de "plug nozzle" onbruikbaar was (Schild & Harriott, 1973). Naast snelheidsverschillen in de straal door wrijving in het spuitstuk kunnen "zijwind"



Figuur 2.3 Gebruikte waterdrukken en debietrange bij diverse toepassingen van waterstralen onder hoge druk (naar WOMA, Duisburg, Duitsland).



Figuur 2.4 Schematische weergave van het werkings-principe van een hogedruk waterstraalsnijder (naar Hashish, 1985 in Powell, 1998).

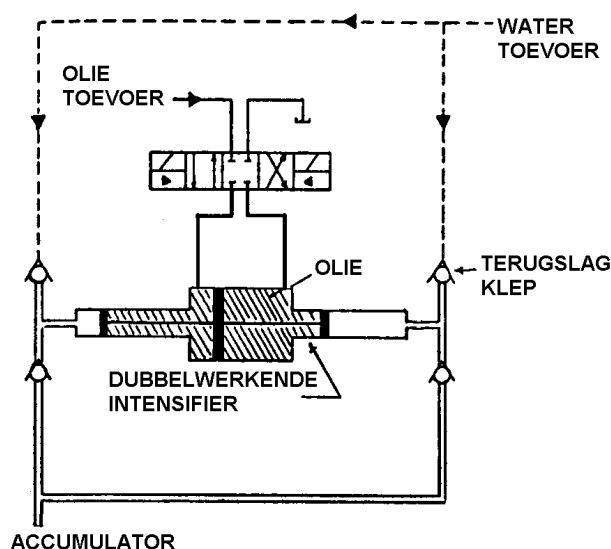
ofwel het zijwaarts bewegen van de straal de samenhang verstoren. Elkaar opvolgende delen van de straal volgen ten opzichte van de lucht elk een nieuwe baan, terwijl de vloeistof in een stilstaande straal zonder zijwind als het ware wordt “meegezogen” in de baan van de voorafgaande stroom. Bij industriële toepassingen wordt doorgaans het te snijden voorwerp of het spuitstuk met een robotarm of een computergestuurde XY tafel ten opzichte van elkaar bewogen.

De snijcapaciteit van een straal is een functie van de diameter, snelheid en de coherentie van de straal. Het verkrijgen van een coherente straal is moeilijker naarmate de straal dunner is en de druk hoger is (Valco *et al.*, 1989). Naarmate de spuitdop verder van het te snijden voorwerp af staat heeft men dus meer water nodig, of een hogere druk. Om de samenhang van de straal te behouden moeten de druk-debiet combinaties binnen bepaalde randvoorwaarden liggen, die door het dooptype en “windsnelheid” worden bepaald.

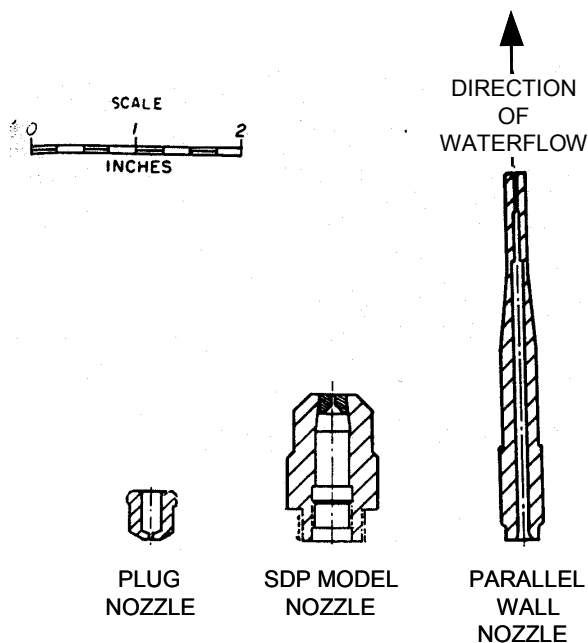
Door de pulserende supersonische waterstroom zijn industriële waterstralers zeer luidruchtig. De onderhoudskosten zijn hoog door de beperkte levensduur van de bewegende delen in de intensifier (Valco *et al.*, 1989).

In de akkerbouw is vooral geprobeerd om waterstraalsnijden toe te passen bij de oogst van groentegewassen en voor het dunnen.

Schild & Harriott (1973) onderzochten het doorsnijden van slastammen met drie typen waterstraaldoppen (Figuur 2.6) met verschillende uitstroomopeningen en bij verschillende waterdrukken. De SDP-dop (Spray Dry-Plug) bleek de meest coherente straal te leveren, wat nodig is om een gladde snede te bereiken. De systeeminstellingen waarbij alle stammen doorgesneden werden en waarbij het energieverbruik minimaal was werden als “beste resultaten” gerapporteerd. Bij een SDP-dop met een passagesnelheid van 0,67 m/s (2,4 km/h) werden de “beste resultaten” verkregen bij een afstand van uitstroomopening tot



Figuur 2.5 Waterdrukverhoging met een hydraulische intensifier (naar Valco *et al.*, 1989).



Figuur 2.6 De typen waterstraaldoppen, gebruikt door Schield & Harriot (1973).

slastam van 3 cm, een diameter van de uitstroomopening van 6 mm, een waterdruk van 345 bar, dientengevolge een debiet van 3,2 l/min en een continu vermogen van 3,7 kW. Bij een passagesnelheid van 1,34 m/s (4,8 km/h) werden de beste resultaten verkregen bij een afstand van uitstroomopening tot slastam van 6 cm, een diameter van de uitstroomopening van 11 mm, een waterdruk van 275 bar, dientengevolge een debiet van 8,9 l/min en een continu vermogen van 8,2 kW.

Posselius & Conklin (1986) onderzochten het kappen van peen met behulp van waterstraal-snijden. De resultaten (Tabel 2.1) geven een indruk van de dopuitstroomopeningen en waterdrukken die nodig waren om peen van verschillende doorsnede te snijden.

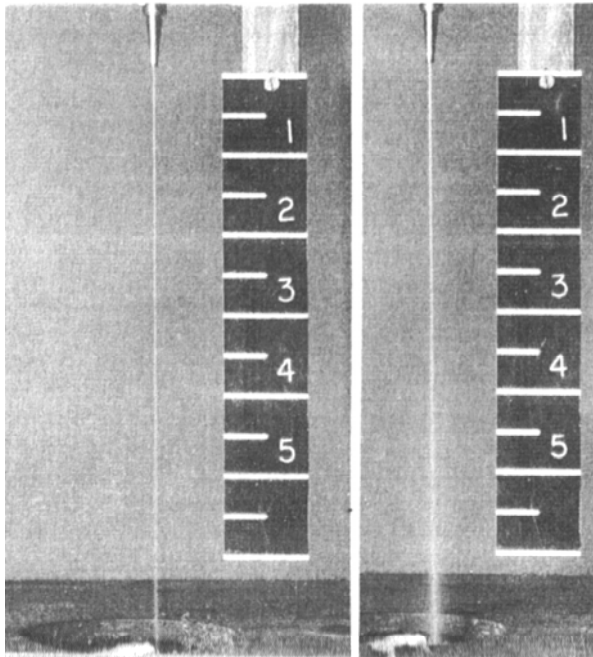
Tabel 2.1 Benodigde waterdruk (bar) bij verschillende dopuitstroomopeningen (mm) om peen van verschillende diameter (mm) te doorsnijden.

Diameter van uitstroomopening (mm)	Diameter van het snijvlak van de peen (mm)			
	50	65	75	90
1,35	186	221	236	255
1,02	238	262	290	336
0,95	286	341	369	410
0,70	386	436	531	586
0,57	536	586	669	736

Warner (1975) onderzocht de mogelijkheden van waterstraaltechniek voor het dunnen van rijgewassen. Hij ontwierp een snijdop met een diameter van de uitstroomopening van 0,35 mm, die over een afstand van tenminste 10 cm een coherente waterstraal gaf bij een druk van 210 bar (Figuur 2.7). In een testopstelling, met een afstand dop-zaailing van ca 5 cm en een passagesnelheid van 2,7 m/s (9,7 km/h), werden zaailingen, die nog geen vezelkern in de stengel hadden, vlak boven de grond doorgesneden met een waterstraal komend van de speciaal ontworpen dop met een waterdruk van 140 bar (waterverbruik 0,83 l/min).

Vervolgens werden, met dezelfde dop bij 140 bar, veldproeven uitgevoerd met koolplanten, 17 dagen oud ( $\varnothing$  1,5 mm) en 5 weken oud ( $\varnothing$  3 mm), bij een snelheid van 0,67 m/s (2,4 km/h). Van de 17 dagen oude planten werd ongeveer 60-70% doorgesneden en van de 5 weken oude planten praktisch geen. Ook proeven met een wat grotere uitstroomopening van 0,53 mm waren geen succes. Het bleek wel mogelijk, bij deze relatief lage waterdruk en kleine uitstroomopening, om met een elektrisch geschakelde kraan de waterstraal aan en af te schakelen (schakeltijd: open 6 ms en dicht 20 ms). Warner schatte dat goede doorsnijding mogelijk zou zijn als de planten vlak onder het grondoppervlak gesneden zouden worden bij een druk van 700-1.050 bar en mogelijk met een grotere uitstroomopening. De conclusie was dat het dunnen met waterstraaltechniek niet haalbaar was, met name vanwege de te lage precisie die gehaald werd bij het regelen van zowel de afstand tussen de waterstraaldop en de plant, dwars op de rij, als bij het regelen van de hoogte van de dop ten opzichte van de planten.

In 1999 werd verkennend onderzoek naar het gebruik van dunne, coherente waterstralen onder hoge druk voor het afsnijden van onkruid op verharding uitgevoerd (Kurstjens *et al.*, 1999). Een Falch 500 hogedruk-waterstraalunit werd gebruikt in combinatie met een spuitlans met een 1,4 mm puntstraaldop (1/4", NPT draad), die bij 500 bar een debiet van 27 l/min



Figuur 2.7 Lengte van de coherente waterstraal van de 'Warner-dop' bij een druk van 105 bar (rechts) en een druk van 210 bar (links); de afstand is aangegeven in inches.

geeft. Bij het verlaten van de dop heeft de straal een theoretische snelheid van 292 m/s. De snelheid neemt snel af met de afstand van de dop door spreiding van de straal. Het spuitbeeld van de dop was slechter dan verwacht. Reeds op ongeveer 3 cm afstand van de dop werd de straal turbulent.

Aanvankelijk werd een druk van 500 bar toegepast op een bestrating van gebakken klinkers. Het onkruid dicht bij de uitstroomopening werd goed doorgesneden. De tegendruk van de lans was zo hoog dat continu werken niet mogelijk was. Ook werd er veel grond tussen de klinkers uitgespoten. De druk werd vervolgens verlaagd tot 350 bar, waarbij het onkruid nog steeds goed werd doorgesneden.

Het uitspoelen van grond tussen de voegen kan beperkt worden door de hoek tussen de straal en het grondoppervlak te verkleinen. Bij een hoek  $< ca\ 10^\circ$ , werd nauwelijks grond uit de voegen tussen klinkers of tegels gespoeld. Als een dergelijke straal in lijn is met een voeg wordt alleen grond verwijderd uit de langere voegen ( $ca\ 10\ cm$  of meer). Spuiten dwars op de voeg tastte de grond in de voeg niet aan. Bij een hoek van  $ca\ 30^\circ$  was de uitspoeling van grond zodanig, dat vierkante betonklinkers van  $10\ x\ 10\ cm$  na het waterstralen enigszins los kwamen te liggen. Dit effect trad ook op als de straal niet in lijn was met de voeg. Uitspoeling van grond is niet wenselijk omdat de verharding daardoor kan verzakken. Ook zou onkruid zich na het wegspoelen van grond dieper in de voeg zou kunnen vestigen, waardoor het waarschijnlijk moeilijker verwijderbaar is, vooral bij brede voegen of onregelmatig gevormde stenen. Aanvullen met schoon zand in de voegen kan wellicht vestiging en hergroei van onkruid voorkomen.

Betonklinkers en betontegels ondervonden geen schade van de waterstraal. De in het poreuze oppervlak gevestigde algen werden verwijderd als afstand tussen spuitkop en klinker kleiner dan  $ca\ 10\ cm$  is. Gebakken klinkers (met kleine barsten) werden wel beschadigd: sommige hoeken braken af en werden  $ca\ 20\ meter$  weggeslingerd. Dit leverde gevaarlijke situaties op. Losgespoten grond kan objecten eventueel vervuilen (banken, muren, etc.). Wegspuitend steen, maar ook afval en los gespoten grond zouden moeten worden opgevangen door een afscherming die goed op het oppervlak aansluit. Op ongelijk terrein vormden zich op de diepere delen waterplassen die verdere behandeling hinderden.

Het effect van een waterstraal op het onkruid was vergelijkbaar met dat van borstelen, omdat alleen de boven de verharding uitstekende onkruiddelen worden verwijderd. Naarmate de afstand tussen spuitstuk en onkruid groter is, vermindert het snijdend effect en wordt bovengrondse massa als het ware afgerukt. De onkruidsoort, onkruidgrootte en de vestigingssituatie beïnvloeden de lengte van de zone waarbinnen de waterstraal onkruid kan verwijderen en de hoeveelheid achterblijvend materiaal. Klein onkruid in een brede of diepe voeg, b.v. liggend vetmuur (*Sagina procumbens*) en klein gras tussen gebakken klinkers, bleek nauwelijks verwijderbaar. Grote pollen gras tussen met een kleine grondlaag bedekte betonklinkers (smalle voegen) werden binnen  $15\ \text{à}\ 20\ cm$  van de spuitkop geheel afgesneden. Ook grote paardebloemen werden goed afgesneden. De waterstraal had goed greep op de meer dan  $30\ cm$  lange spruit van Heermoes (*Equisetum arvense*) zodat deze planten snel konden worden verwijderd, waarbij slechts  $10\ cm$  lang stengelresten achterbleven. Deze konden bij een tweede passage ook worden afgesneden tot op  $ca\ 1\ cm$  boven het tegeloppervlak.

Het effect van waterstraal-snijden en de situaties waarin deze techniek zou kunnen worden ingezet komen vrijwel overeen met die van de bestaande borstels. Uit de verkenning kwamen de volgende mogelijke voor- en nadelen t.o.v. borstels naar voren:

- De waterstraal vergt weinig ruimte en is goed te richten; daardoor kunnen ook moeilijk bereikbare plekken behandeld worden;
- In principe bestaat de mogelijkheid om een breed werkgebied in één werkgang te behandelen door meerdere waterstraalkoppen in één apparaat te bouwen of door één oscillerende straal een breed gebied te laten behandelen. Een borstel heeft een smal werkgebied (ca 10 cm), zodat het apparaat steeds heen en weer moet rijden;
- In combinatie met onkruidpositie-herkenning en nauwkeurige straalbesturing zouden alleen de begroeide plaatsen kunnen worden behandeld. Hierdoor zou de capaciteit kunnen toenemen terwijl de aan beschadiging blootgestelde oppervlakte afneemt;
- Een waterstraal-wagen is mogelijk voor meerdere doelen bruikbaar (verwijderen graffiti, kauwgum, gevelreiniging);
- De straal moet nauwkeurig op de voeg worden gericht voor een goede werking. Een te hoog gerichte straal “blaast” het onkruid slechts omver, terwijl een te laag gerichte straal op de verharding uiteen spat en daardoor snelheid en effectiviteit verliest;
- Net zoals bij borstelen wordt onkruid niet geheel verwijderd, zodat een volgbewerking nodig is. Grond, vuil en onkruid worden echter nat gemaakt en zijn daardoor waarschijnlijk moeilijker door gelijktijdig vegen of zuigen te verwijderen;
- Als het watergebruik niet kan worden verlaagd (nu 1.620 l/h bij 500 bar), zou een machine vaak moeten tanken of erg zwaar worden, met mogelijk verzakte bestrating of gebroken tegels als gevolg;
- Voor de aandrijving van de pomp is een zwaardere motor nodig dan voor een borstelmachine. Dit betekent een hoger brandstofverbruik, een hoger gewicht en meer geluidsproductie.

In 2000 werd onkruidbestrijding met hogedruk waterstralen ook verkennend onderzocht op ZOAB (Kortenhoff *et al.*, 2000). Dit gebeurde met een Falch T5 hogedrukspuit met een spuitlans met een dopopening van 1,5 mm diameter en een waterdruk van 400 bar. Hierbij bleek dat:

- De hoek tussen waterstraal en asfalt 15-30° dient te zijn, waarbij de bestrijdingssnelheid, maar ook de ZOAB-belasting, toeneemt bij een grotere hoek;
- Voor het afsnijden van een onkruidplant is gemiddeld 1,0 s (bij een spuihoek van 30°) tot 1,5 s (bij een spuihoek van 15°) nodig;
- De straal dient vrij nauwkeurig op de onkruidplek gericht te worden (binnen 1 cm);
- De “bruikbare” lengte van de waterstraal is ca 10 cm;
- De reactiekracht van de waterstraal op de bediening c.q. besturing is aanzienlijk;
- De hergroei van grassen op het ZOAB was na 28 dagen 73% bij een spuihoek van 30° en 95% bij een spuihoek van 15°;
- Op sommige plaatsen werd het ZOAB beschadigd door de waterstraal. De indruk was echter dat de door de waterstraal weggespoten ZOAB deeltjes al door het aanwezige onkruid losgewrikt waren en daardoor geen weerstand konden bieden aan de waterstraal.



ZOAB dient regelmatig gereinigd te worden omdat de doorlatendheid afneemt door inspoeling van grond- en rubberdeeltjes. Hiervoor wordt doorgaans een hogedrukreiniger in combinatie met een waterzuiger gebruikt (Hydrovac; ca 150 bar waterdruk). Onkruid wordt met de Hydrovac onvoldoende bestreden.

Voor het verwijderen van verflagen van staalplaatconstructies worden wel waterstraalnozzles op een roterende as, onder een afdekkap, gebruikt. Voor deze toepassing is de waterdruk ongeveer 5.000 bar. De werkbreedte is ca 40 cm. Het verbruikte water, inclusief verfristen, wordt afgezogen. Met dergelijke apparatuur kan een strook gelijkmatig bewerkt worden met waterstralen, waarbij de hoek met het behandelde oppervlak constant is (en instelbaar). Wellicht zijn er mogelijkheden om een dergelijke uitvoering, bij lagere druk (in de range 400-1.000 bar), ook voor onkruidbestrijding op verharding toe te passen. Indien haalbaar, zou het weer opzuigen van water, losgesneden onkruid en grond een voordeel zijn omdat geen nabewerking meer nodig is. Door de overkapping is ook de veiligheid gewaarborgd.

Ontdekt werd dat reiniging met roterende nozzles in combinatie met opzuigen van verspoten water, grond en gewasresten al wordt toegepast bij een waterdruk van ca 500 bar in een Zwitserse machine voor ZOAB reiniging (Frimokar). De hoek waaronder de waterstraal het asfalt raakt is op deze machine 60-70°. De machine heeft in totaal 6 spuitdoppen (drie rotors) en een werkbreedte van 2,50 m. Het onkruidbestrijdend effect op ZOAB is oriënterend onderzocht op een wegvak in de omgeving van Arnhem door RWW en de firma IJzerman. De ervaringen waren dat de zichtbare delen en een deel van de wortels goed verwijderd worden (IJzerman, pers. comm. 2000). De wortels groeien echter ook in aanwezige scheurtjes in de laag beneden de ZOAB toplaag. Deze worteldelen worden niet verwijderd, zodat hergroei optreedt. De algemene ervaring met toepassing van waterstralen op ZOAB was dat 500 bar ongeveer de maximum druk is die toegepast kan worden omdat anders het asfalt beschadigd wordt. Toepassing van 1.000 bar is alleen mogelijk als de waterstraal intermitterend toegepast wordt.

Zou men denken aan toepassing van het 'Frimokar' principe voor onkruidbestrijding op verhardingen met een waterdruk van ca 500 bar, spuitdoppen onder een hoek van 20°, een werkbreedte van 80 cm en een rijsnelheid van 1 km/h, dan heeft men een indicatie van de mogelijke productiviteit (bruto 660 m<sup>2</sup>/h) en het waterverbruik (2,15 l/m<sup>2</sup>). Een handunit of robotarm met kleine roterende spuitdoppen en afzuiging, aangesloten op meerrijdende apparatuur kan wellicht rond obstakels goede diensten bewijzen.

## Waterstaalsnijden: mogelijkheden en beperkingen

### **Technische mogelijkheden**

Benodigde waterdruk waarschijnlijk 300-500 bar voor snel genoeg afsnijden. Door roterende nozzles onder een vaste hoek met en afstand tot de verharding is bewerking van een strook waarschijnlijk mogelijk. Toepassing wellicht als waterstraal-bosmaaier of waterstraal-borstelmachine. Zonder een dergelijke constructie is richten van de waterstraal op de basis van de onkruidplant nodig. Verwacht wordt dat het laatste alleen op langere termijn interessant is in combinatie met onkruidensoren en automatische sturing van de waterstraal.

### **Bestrijdingseffectiviteit**

De actie is vergelijkbaar met borstelen. Het toegediende vocht kan hergroei bevorderen. Verwachte effectiviteit is gelijk of iets kleiner dan bij borstelen.

### **Inzetmogelijkheden**

Vergelijkbaar met borstelen. Waterstraal-bosmaaier rond obstakels en moeilijk bereikbare plaatsen op verhardingen. Waterstraal-borstelmachine op vlakke verhardingen, waaronder ZOAB. Inzet is waarschijnlijk onder alle weersomstandigheden mogelijk.

### **Productiviteit**

Verwacht wordt dat bij toepassing van roterende nozzles, in combinatie met water en vuilafzuiging, de productiviteit iets hoger zal kunnen liggen dan van een vergelijkbare bosmaaier of onkruidborstelmachine. Rond obstakels hoeft waarschijnlijk minder nauwkeurig gewerkt te worden dan met de bosmaaier, waardoor de productiviteitsverwachting hoog is.

### **Milieu**

Door indirecte energie-aanwending, via verdringerpomp, en door leidingweerstand zal het energieverbruik hoger liggen dan bij borstelen. Cijfers voor energie- en waterverbruik bij toepassing van waterstraalsnijden in de praktijk moeten door proeven vastgesteld worden.

### **Veiligheid/neveneffecten**

Schade mogelijk door rondvliegende steentjes e.d.; beveiliging door beschermkap lijkt goed mogelijk. Door de waterstraal wordt eventueel grond uit de voegen tussen verhardingselementen weggespoeld. Mogelijk is aanvulling met zand nu en dan noodzakelijk om verzakkingen te voorkomen.

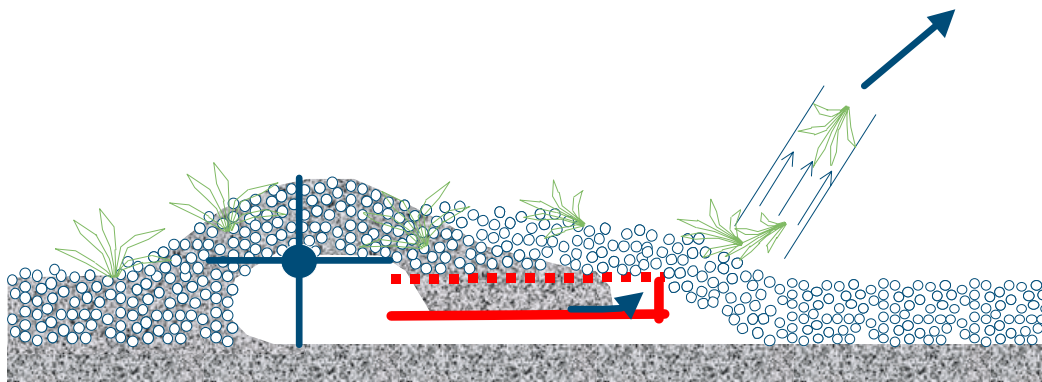
### **Kosten**

De kosten per m<sup>2</sup> zullen zeer afhankelijk zijn van de in de praktijk behaalde capaciteit, de benodigde druk en het waterverbruik (aanvoerkosten). Een ruwe schatting is dat de kosten 2 tot 3 keer hoger zijn dan van borstelen.

## 2.3 Verharding bewerken

Als er in de voegen van elementverharding meerjarig onkruid staat dat steeds weer zeer snel aangroeit na verwijdering van de bovengrondse delen, besluiten beheerders wel om de stenen op te nemen, de wortels uit het zandbed te verwijderen en de stenen opnieuw te leggen. Deze methode is zeer effectief en kost weinig energie, maar vraagt veel arbeid.

Op halfverhardingen groeit weinig onkruid mits de verhardingslaag dik genoeg en schoon is. Op den duur worden de poriën in de halfverharding echter opgevuld met ingelopen grond, organisch materiaal van verteerd blad en dergelijke. Halfverhardingen zoals grind werden in vroeger tijd vaak wekelijks geharkt. Hierdoor werd het eventuele onkruid op plekken waar de verharding vervuild was met grond effectief, in een jong stadium bestreden. Hiermee werd doorgegaan totdat nog maar een dun, los laagje grind over was. In dat stadium werd dan vaak een laagje nieuw grind opgebracht. Bij openbare halfverhardingen behoort frequent harken vaak niet tot de mogelijkheden omdat het te duur is. Een idee om toch de onkruidwerendheid van schoon grind (of een andere halfverharding) te benutten is om bijvoorbeeld eens per jaar de halfverharding machinaal op te nemen, te reinigen en terug te leggen (Figuur 2.8). Ter indicatie zou een dergelijke machine bij 80 cm werkbreedte een 20 kW trekker vereisen en dan een snelheid van 1,5 km/h kunnen halen. De netto productiviteit zou dan 1.200 m<sup>2</sup>/h zijn en, bij een efficiëntie van 60%, de bruto productiviteit 700 m<sup>2</sup>/h. Het energieverbruik (fossiel) zou uitkomen op ca 240 kJ/m<sup>2</sup>.



Figuur 2.8 Principe van opnemen, reinigen en terugleggen van halfverharding voor wering en bestrijding van onkruid.

## Halfverharding bewerken: mogelijkheden en beperkingen

### **Technische mogelijkheden**

Technisch is het opnemen, reinigen en terugleggen van halfverharding haalbaar.

### **Bestrijdingseffectiviteit**

De verwachte bestrijdingseffectiviteit is uitstekend; alle onkruid wordt met wortel en al afgevoerd en nieuwe kieming wordt tegengegaan door het teruggelegde schone laagje halfverharding.

### **Inzetmogelijkheden**

Vooral op grindpaden.

### **Productiviteit**

Bruto ca 700 m<sup>2</sup>/h bij 80 cm werkbreedte.

### **Milieu**

Verwacht wordt een laag energieverbruik van ca 240 kJ/m<sup>2</sup>. De eventueel verontreinigde, uitgezeefde grond moet afgevoerd worden.

### **Veiligheid/neveneffecten**

De methode is veilig. Een gunstig neveneffect is dat een schaarse bouwstof zoals grind hergebruikt wordt.

### **Kosten**

0,30-0,50 €/m<sup>2</sup>, 1 x per 3 jaar, inclusief aanvullen met 2 cm grind.

### 3 Thermische bestrijding

Plantenweefsel kan vernietigd worden door verhitting. De bestrijdingseffectiviteit 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 experimenten met convectieve warmte-overdracht werd plantenweefsel gedood bij een temperatuur tussen de 55 en 94°C (Anderson *et al.*, 1967; Daniell *et al.*, 1969; Hansen *et al.*, 1970; Porterfield *et al.*, 1971; Hoffmann, 1989) bij blootstellingstijden tussen 0,065 en 0,13 seconden (Thomas, 1964; Daniell *et al.*, 1969). 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, stengel of plant. Deze gradiënten kunnen makkelijk ontstaan doordat de warmtegeleiding binnen een plant doorgaans erg klein is ten opzichte van de convectieve warmteoverdracht bij hoge temperatuurverschillen tussen omgeving en plant (Bertram, 1996).

Plantendelen die boven de verharding uitsteken kunnen verhit worden door overdracht van energie via contact met een draagmedium (hete gassen, heet water of een heet vast object), via straling of via verhitting d.m.v. een elektrisch veld (§ 3.1). Het afkoelen van bovengrondse delen tot temperaturen die schade berokkenen aan de bovengrondse plantendelen is geen sinecure en zou extreem veel energie vragen. Bevriezing mag daarom als niet praktijkgericht worden beschouwd (Fergedal, 1994) en wordt in dit rapport niet verder besproken.

Alle huidige onkruidbranders zijn gebaseerd op verhitting van de bovengrondse delen. Onkruiden met ondergrondse delen die opnieuw kunnen uitlopen vertonen daarom hergroei na branden. De maximum bestrijdingseffectiviteit bij branden mag verwacht worden als alle bovengrondse delen volledig vernietigd zijn. In de praktijk worden echter bij een zekere warmtedosis meestal niet alle bovengrondse delen voldoende verhit. Oorzaken hiervoor zijn:

- De gevoeligheid van planten voor verhitting loopt uiteen (Ascard, 1995; Vester, 1990; Rahkonen & Vanhala, 1993; Ascard, 1989; Netland *et al.*, 1994) vanwege verschil in grootte, de ligging van groeipunten, beschermende was- of haarlaag, mate van verhouting en weefseleigenschappen;
- Afscherming door andere plantdelen;
- Onvoldoende stroming van hete gassen in dichte pollen van onkruiden.

Hierdoor kunnen bijvoorbeeld groeipunten onbeschadigd blijven en treedt er al snel weer hergroei op. De bestrijdingseffectiviteit van branden wordt daarom in onderzoek weergegeven als energiedosis-responscurven, waarbij uiteenlopende responsvariabelen gebruikt worden om de groeiremming of doding te kwantificeren.

In principe zouden ondergrondse plantendelen ook vernietigd kunnen worden door verhitting. Op verhardingen betekent dit echter in het algemeen dat ook de grond waarmee de wortels in direct contact zijn vanaf het verhardingsoppervlak verhit moet worden, hetgeen onrealistisch veel energie en tijd zou vragen. Een uitzondering hierop is wellicht de mogelijkheid om met ultra korte golfstraling (magnetron) de (waterhoudende) wortels selectief te verhitten onder droge grondomstandigheden in straattelementvoegen (§ 3.2).

In principe zouden planten met minder energie bestreden kunnen worden door ze selectief te verhitten (§ 3.3). Er valt dan te denken aan:

- Plaatselijk verhitten: thermisch afsnijden van de bovengrondse delen;
- Alleen verhitten van specifieke bestanddelen van de plant (bladgroen, eiwitten), waardoor het functioneren van de plant geblokkeerd wordt.

### 3.1 Verhitten van bovengrondse delen

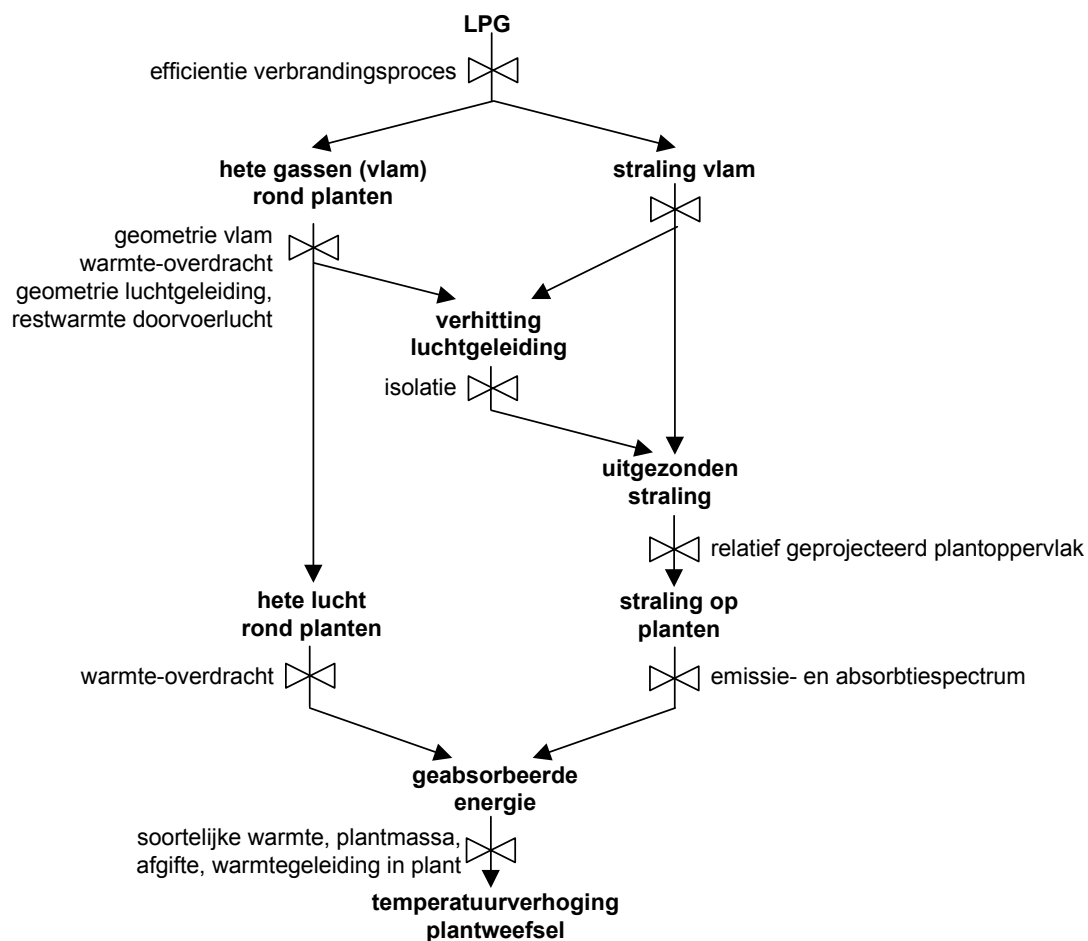
#### 3.1.1 Hete gassen (stootbranden)

Het direct verhitten van bovengrondse plantendelen door verbrandingsgassen (stootbranden) is een bekend bestrijdingsprincipe dat in de praktijk toegepast wordt. Bij de huidige stootbranders wordt een vlam (hete gasstroom) opgewekt onder een geïsoleerde metalen kap, waaronder de gasstroom langs de planten wordt geleid. Als brandstof voor de branders wordt vaak LPG gekozen, maar ook propaan en huisbrandolie worden gebruikt. Gebruik van industriële gassen (zuurstof) om de vlamtemperatuur te verhogen is uit kostenoverwegingen niet verder onderzocht. Bij een goede verbranding van deze brandstoffen, met exact de juiste hoeveelheid lucht als zuurstofbron, is de vlamtemperatuur maximaal ca 2.000°C. In de praktijk wordt een overmaat aan lucht gebruikt, zowel bij conventionele branders met natuurlijke luchtaanzuiging van onder de kap als bij branders met een geforceerde luchttoevoer. Een vlamtemperatuur van een goede brander is ongeveer 1.800°C. De kap zorgt ervoor dat de overigens afkoelende gasstroom lang in contact blijft met de planten onder de kap, hetgeen de warmteoverdracht bevordert (Ascard, 1995; Bertram, 1996). De gemiddelde luchttemperatuur aan het grondoppervlak hangt af van de constructie, maar kan bij een moderne brander met geforceerde luchttoevoer ca 500-600°C zijn. De lengte van de kap en de rijsnelheid bepalen de verblijfsduur van de planten. De verblijfsduur en de gastemperatuur onder de kap bepalen de energieoverdracht.

Opgaven van het energieverbruik van branders (bijv. in liters LPG per uur) door fabrikanten hebben betrekking op het theoretisch (netto) verbruik, gebaseerd op de werkbreedte en een gekozen rijsnelheid. Dit zegt nog niets over het bruto energieverbruik voor een effectieve doding in de praktijk. Het werkelijke verbruik hangt onder meer af van de dosis-responscurve van de brander onder verschillende omstandigheden.

In de landbouwpraktijk wordt bij volvelds onkruidbranden, zonder obstakels, netto 150 tot 300 kJ/m<sup>2</sup> (30-60 kg LPG per ha) verbruikt (Kurstjens, 1998), afhankelijk van de hoeveelheid onkruid. Op basis van de gegevens van Hoksbergen (2000) en Geffen *et al.* (2001) varieert het bruto fossiel energieverbruik bij stootbranden op verhardingen in de praktijk van 460 kJ/m<sup>2</sup> bij lichte onkruidgroei en weinig obstakels tot 1.830 kJ/m<sup>2</sup> bij zware onkruidgroei en veel obstakels. Dit bruto verbruik is dus het totaal, voor plantdoding (bijv. propaan) en toediening (voertuigverbruik, bijv. diesel), rekening houdend met overlap, loos rijden en oponthoud door obstakels. Te weinig is nog gekwantificeerd welke bestrijdingseffectiviteit in de praktijk op verharding nagestreefd wordt en wat de gehanteerde norm voor bestrijdingseffect betekent voor de effectiviteit op langere termijn. Doorgaans wordt in de praktijk 3 tot 5 keer per jaar gebrand.

In figuur 3.1 wordt het energiestroomschema van een LPG brander weergegeven. Het convectieve warmteoverdrachtproces werd gemodelleerd door Bertram (1996). Verhitten van plantendelen met een vlam gaat altijd gepaard met energieverliezen bij de verbranding (brandstofconversie) en energieverliezen naar de omgeving (bodem en lucht). Het onderzoek naar verbetering van branders is vooral gericht geweest op beperking van deze verliezen. Bertram (1996) richtte zich op beperking van de energieverliezen bij de brandstofconversie door minimalisering van het luchtoverschot bij de verbranding. Bertram (1996) ontwikkelde ook een nieuw concept, de Low Temperature Weeder. Bij deze machine wordt de hete lucht gecirculeerd binnen een geïsoleerde omgeving die aan de onderzijde open is. Hierdoor wordt de afkoeling van de lucht door de omgeving beperkt, maar moet wel genoeg genomen worden met een lagere luchttemperatuur (300-400°C), waardoor de benodigde blootstellingstijd toeneemt. In de huidige praktijkmachines wordt het energieverlies naar de omgeving beperkt door aan de binnenzijde van de geïsoleerde kap een rooster aan te brengen dat verhit wordt (ca 400°C) door de niet direct door de planten of bodem geabsorbeerde energie. Het hete rooster geeft vervolgens de energie deels weer af in de vorm van langgolvlige infrarood straling, die door het onkruid alsnog kan worden geabsorbeerd (M. Looman, HOAF, pers. med., 1998, 2002). Het bekendste voorbeeld van dit



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

systeem is het Infraplus® systeem van HOAF, maar het principe wordt ook in andere stootbranders toegepast.

De belangrijkste criteria voor geschiktheid van stootbranders op verharding zijn beperkte afmetingen en hoge productiviteit. Dit betekent dat machines met een zo hoog mogelijke temperatuur (veel vermogen per m werkbreedte) de voorkeur hebben. Technisch gezien betekent dit dat men aanloopt tegen de beperkingen van simpele branders, namelijk de beperkte mogelijkheid voor gasafname (in gasvorm) uit gasflessen door afkoeling (bevrozing) van de flessen en de beperkte toevoer van verse lucht onder de kap voor de verbranding van het gas. Huidige, geavanceerde branders hebben daarom enerzijds voorzieningen voor vloeibare brandstofafname uit gasflessen en verdamping in speciale verdamperen en anderzijds voorzieningen voor geforceerde toevoer van lucht naar de branders onder de kap. Bij hogere temperaturen onder de kap is ook extra aandacht vereist om smelten en eroderen van metalen onderdelen tegen te gaan en neveneffecten van hete gassen die vanonder de zijkanten van de kap ontsnappen te beperken.

Uit het voorgaande blijkt dat er waarschijnlijk grote verschillen in geschiktheid voor gebruik op verharding bestaan tussen verschillende typen stootbranders. Vergelijkend onderzoek op dit punt lijkt daarom zinvol.

Voor onkruidbestrijding rond obstakels zijn handbranders in de handel. Ook voor handbranders geldt dat de afmetingen van de branderkap beperkt moeten blijven en dat hoge capaciteit belangrijk is. Dus ook voor handbranders geldt dat de temperatuur onder de kap zo hoog mogelijk dient te zijn. Bovendien moet de apparatuur makkelijk hanteerbaar zijn, dus licht van gewicht en men moet er makkelijk mee rond obstakels kunnen werken. In de praktijk worden om die redenen wel branders zonder kap gebruikt, waarbij de warmteoverdracht uitsluitend door direct vlamcontact plaatsvindt.

In principe zijn er mogelijkheden om de energie-efficiëntie van stootbranders te verbeteren door pleksgewijs behandeling, d.w.z. het "richten" van de energiestroom op de te behandelen planten. Voorbeelden hiervan zijn een sensorgestuurde vuurmond of een grid van branders onder een kap waarvan het gasdebiet per afzonderlijke brander geregeld wordt (modulerende vlam). Voor mogelijke toepassing hiervan moet het onkruid gedetecteerd worden en moet de noodzakelijke besturingstechniek ontwikkeld worden (zie ook hoofdstuk 4).



## Hete gassen (stootbranden): mogelijkheden en beperkingen

### **Technische mogelijkheden**

Een hoge gemiddelde luchttemperatuur onder de kap is gewenst voor onkruidbestrijding op verharding, eventueel ten koste van de energie-efficiëntie. Met de huidige verbrandingstechnologie, met geforceerde luchttoevoer, wordt een gemiddelde temperatuur van 600-700°C bereikt. Hogere temperaturen zijn in principe mogelijk door plaatsing van meer of grotere branders. Men loopt dan aan tegen de technische grenzen van de hittebestendigheid van de constructie en hoge temperaturen van onder de kap ontsnappende gassen, hetgeen schade en onveiligheid kan veroorzaken. Gebruik van industriële gassen (zuurstof) om de vlamtemperatuur te verhogen is uit kostenoverwegingen niet verder onderzocht.

### **Bestrijdingseffectiviteit**

Er is sprake van een energiedosis-respons curve; bij toenemende energiedosis wordt een steeds groter deel van de bovengrondse plantendelen gedood. Er zijn een groot aantal onkruiden die na branden hergroei vertonen, afhankelijk van de dosis.

### **Inzetmogelijkheden**

Inzet is het gehele jaar door mogelijk, maar effectiever onder droge omstandigheden. Zowel behandeling van vlak terrein als, met handbranders, goten en verharding rond obstakels is mogelijk, uitgezonderd rond obstakels die gevoelig zijn voor brandschade.

### **Productiviteit**

Bruto productiviteit: 300-860 m<sup>2</sup>/h (Hoksbergen, 2000; van Geffen *et al.*, 2001).

### **Milieu**

Bruto fossiel energieverbruik: 460-1.830 kJ/m<sup>2</sup> (Hoksbergen, 2000; van Geffen *et al.*, 2001).

### **Veiligheid/neveneffecten**

Voldoende veilig voor de mens mits aan de veiligheidsvoorschriften voldaan wordt. Onder droge omstandigheden gevaar voor bos- of grasbrand. Gevaar voor beschadiging van straatmeubilair bij toepassing van handbranders. Gevaar voor smelten van asfalt.

### **Kosten**

0,03-0,07 €/m<sup>2</sup> per behandeling.

### *3.1.2 Infraroodstraling*

Verhitten van bovengrondse plantendelen door overdracht van stralingsenergie is een fundamenteel ander proces dan convectieve warmte-overdracht. De opwarming van plantendelen berust in dit geval op absorptie van straling die uitgezonden wordt door infraroodstralers. Gezocht wordt naar condities waarbij weinig straling gereflecteerd wordt en een deel van de straling wordt doorgelaten naar dieper gelegen plantenweefsel. In deze

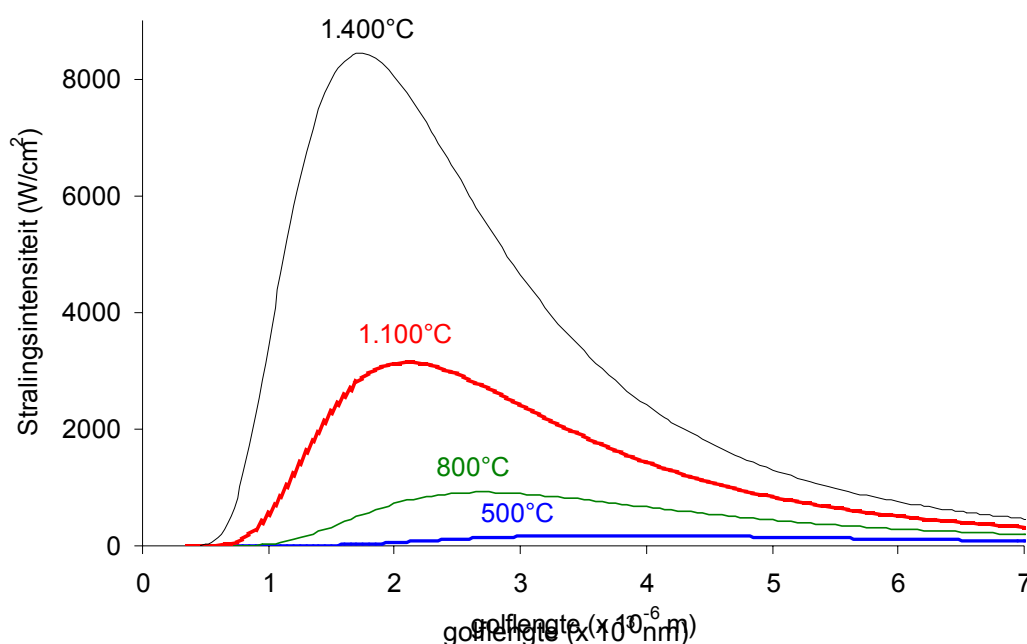
paragraaf wordt achtereenvolgens de opwekking van infraroodstraling, typen stralers, de absorptie van straling door planten, de relatie tussen dosis en respons en de potentie voor toepassing op verharding besproken. Verwezen wordt ook naar een eerdere verkenning van de toepassing van infrarode straling op verhardingen van Kurstjens (1999).

Infrarode straling is elektromagnetische straling in het golflengtegebied van 780 tot  $1 \times 10^6$  nm. Onderscheiden wordt het nabij-infrarood (780-1.400 nm), het midden-infrarood (1.400-3.000 nm) en het ver-infrarood (3.000- $1 \times 10^6$  nm). Infrarood, met name het nabij-infrarood en het midden-infrarood, is de belangrijkste stralingscomponent die wordt uitgezonden door warme oppervlakken. Volgens de wet van Stefan-Boltzman is de totale hoeveelheid uitgezonden straling afhankelijk van de materiaalsoort (kleur van de straler), gekarakteriseerd door de emissiefactor, en neemt de hoeveelheid straling toe met de temperatuur en de oppervlakte van de straler. Het emissiespectrum van de meeste infraroodbronnen lijkt op de in figuur 3.2 weergegeven Planck-krommen. Naarmate de stralertemperatuur hoger is verschuift de piek in de stralingsintensiteit van het emissiespectrum verder in de richting van het nabij-infrarood.

Er bestaan elektrische en gasgestookte infraroodstralers (Figuren 3.3 en 3.4), die veel toegepast worden in ovens, droogtoestellen en verwarmingstoestellen en, beperkt (gasgestookt), voor onkruidbestrijding. Een overzicht van diverse typen infraroodstralers en hun efficiëntie voor het drogen van papier en verf wordt gegeven door Pettersson (1995).

#### *Elektrische stralers*

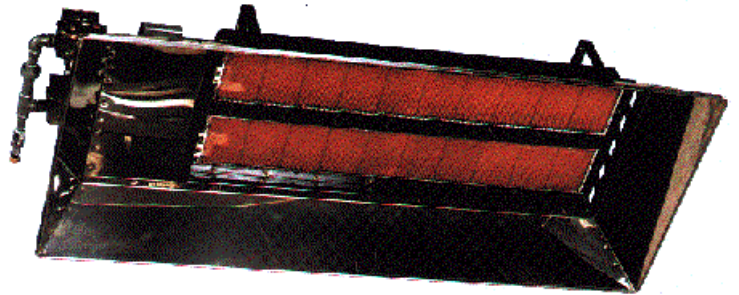
Elektrische stralers (infraroodlampen) bereiken normaal een temperatuur van 2.200-2.400°C en maximaal 2.700°C, waarbij de uitgezonden straling voornamelijk in het nabij-infrarode en midden-infrarode gebied ligt. De elektrische stralers hebben een gloeidraad van wolfram in lampen (van glas) of buizen (van glas of kwarts). De lampen of buizen zijn vacuüm, gevuld



Figuur 3.2 Emissiespectrum van een zwarte straler bij verschillende temperaturen (Planck-krommen).



Figuur 3.3 Elektrische straler met parabolische reflector.



Figuur 3.4 Gasgestookte infraroodstraler voor verwarming van grote ruimten.

met een inert gas (N of Ar) of, bij grote vermogens, gevuld met halogeengas. Kwarts heeft het voordeel dat het vrijwel geheel doorlatend is voor infrarode straling en ook bijdraagt 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 500-7.000 W (doorgaans ca 5.000 W per meter buislengte).

Van het elektrisch vermogen wordt ca 70% (Salmela & Ojala, 1994) tot 84% (Björnberg, 1988) omgezet in infrarode straling. Door achter de stralingslamp een gouden of keramische reflector te monteren komt 60% resp. 50-54% van de elektrische energie als straling op een te verwarmen vlak oppervlak terecht (Björnberg, 1988). Evin (1992) construeerde een straler met beter doorlatend beschermglas en een beter reflecterende concave keramische reflector; het stralerrendement hiervan was 75%. De stralingsintensiteit nabij de lamp of buis is hoog, maar neemt snel af met de afstand tot de lamp of buis. Bij onkruidbestrijding op verharding is het te behandelen oppervlak vlak. Bij behandeling van het gehele oppervlak zullen een aantal buizen naast elkaar gemonteerd moeten worden waarvan de straling naar beneden geprojecteerd wordt. De stralingsintensiteit die we dan op het te behandelen oppervlak mogen verwachten is in de orde van grootte van 25 tot 35 kW/m<sup>2</sup> (opgaaf fabrikanten).

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).

Bij toepassing van elektrische stralers in mobiele apparatuur op verharding zal men er rekening mee moeten houden dat de elektriciteit opgewekt moet worden door bijvoorbeeld een dieselaggregaat. Voor deze energie-omzetting kan een energetisch rendement van ongeveer 30% aangehouden worden. Uitgaande van een stralerrendement van 60% zal

slechts 18% van de energie-inhoud van de verbruikte diesel in de vorm van stralingsenergie de verharding bereiken.

#### *Gasgestookte stralers*

Gasgestookte stralers bereiken doorgaans een temperatuur van 500-900°C en maximaal 1.200°C, waarbij de uitgezonden straling voornamelijk in het midden-infrarode en verinfrarode gebied ligt (Pettersson, 1995; Krieger, 1992). Er bestaan verschillende uitvoeringsvormen:

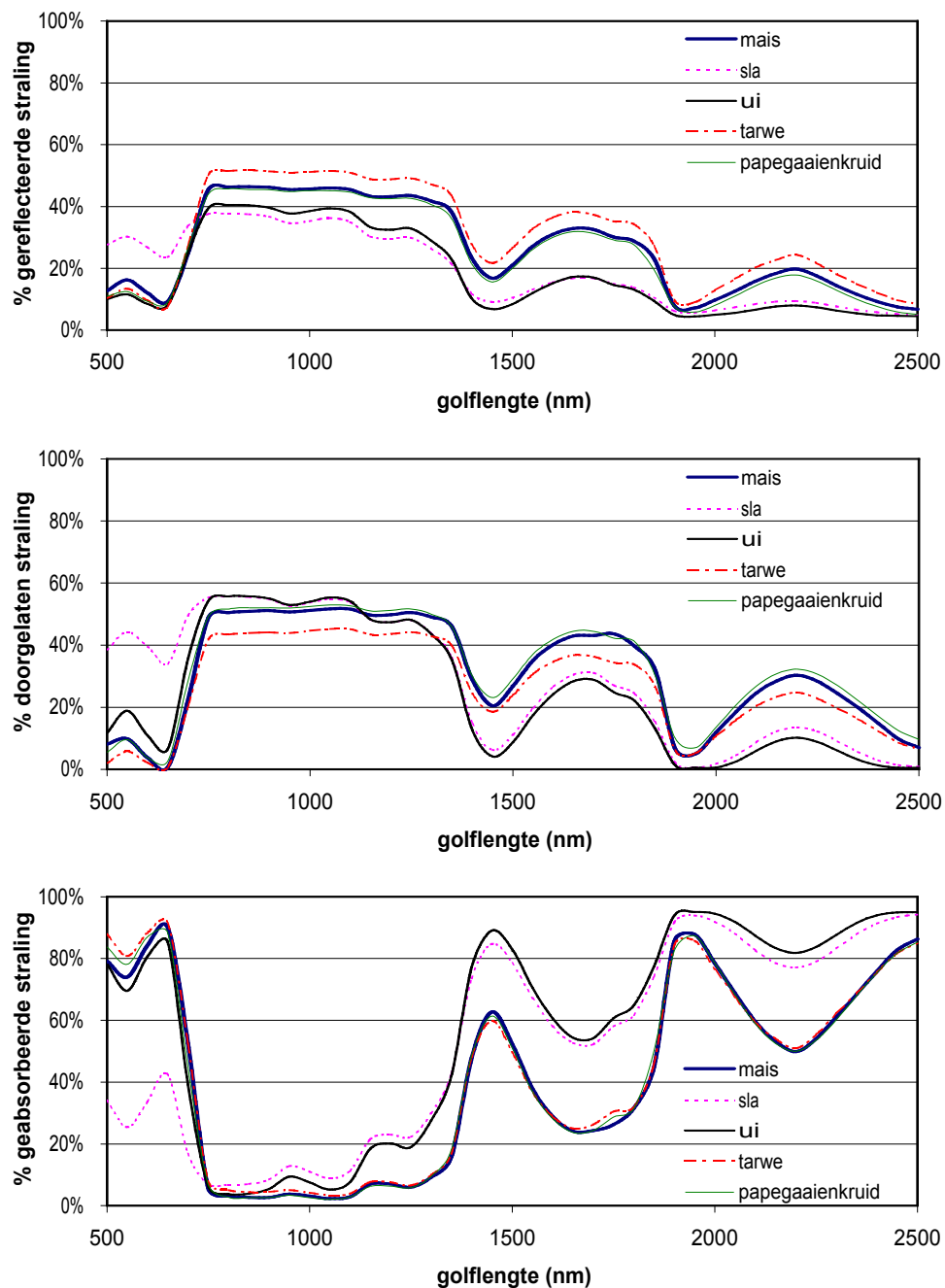
- Stralende pijp, waarbinnen het gas - zuurstofmengsel wordt verbrand (beschreven door Krenin; 1990);
- Katalytische of keramische brander, bestaande uit een gasmengend onderdeel en een poreuze plaat waar het gas-luchtmengsel doorheen gevoerd wordt. De poreuze plaat is tevens het stralend oppervlak. 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;
- Keramische of metalen plaat verhit door een open vlam.

Het energetisch stralerrendement loopt erg uiteen, van 22% tot 63%, en is o.a. afhankelijk van het luchtoverschot en de luchttemperatuur, waardoor de vlam als het ware gekoeld wordt (Senström, 1993). Ook het gebruikte stralermateriaal en de temperatuur van de straler (te regelen door het gasdebiet) zijn van invloed op het stralerrendement. Verschillende auteurs vonden een hoge efficiëntie van 50 tot 70% voor branders met een poreuze keramische plaat of vezelmatrix (Ruiz & Singh, 1992; Duffy *et al.*, 1983; Johansson, 1991). Voor een zwart stralerooppervlak berekenden Speyer *et al.* (1996) dat bij een stijging van de verbrandingsintensiteit van 200 tot 400 kW/m<sup>2</sup>, resulterend in een stijging van de stralertemperatuur van 950 tot 1.150°C, het maximaal haalbare stralerrendement daalt van 63% tot 55%. De stralingsintensiteit neemt hierbij toe van 126 tot 220 kW/m<sup>2</sup>. Omdat in de praktijk de stralertemperatuur maximaal ca 1.000°C is, is de haalbare stralingsintensiteit ca 150 kW/m<sup>2</sup>.

Verdere ontwikkeling van gasgestookte infraroodstralers is gericht op het verhogen van de stralingsintensiteit, rendementsverbetering en het verlagen van de emissie (NO<sub>x</sub>), voornamelijk door toepassing van betere materialen. Madsen (1993) stelde dat in de nabije toekomst branders worden ontwikkeld met een emissiespectrum dat is aangepast aan het absorptiespectrum van het bestraalde materiaal.

#### *Absorptie van straling door planten*

Het emissiespectrum van de straler is van belang omdat de absorptie, reflectie en transmissie van straling door plantenweefsel sterk afhankelijk is van de golflengte. Als voorbeeld hiervan zijn de spectra van het blad van 5 plantensoorten weergegeven in figuur 3.5. Uit de figuur is direct op te maken dat er in het infrarode gebied (> 780 nm) twee uitgesproken absorptie pieken voorkomen, bij ca 1.450 en bij 1.950 nm. Infraroodstralers met een emissiespectrum rond één van deze pieken zullen daarom het meest efficiënt zijn voor het verhitten van blad. Voor dikkere materialen zoals stengels en groeipunten zal het absorptiespectrum anders liggen; uitgaande van gelijke reflectie zal de totale absorptie toenemen en de transmissie afnemen. Een hoge-temperatuur infraroodstraler, met een behoorlijk aandeel uitgezonden straling in het golflengtegebied van 1.600 tot 1.800 nm, is uit overweging van



Figuur 3.5 Gemiddelde reflectie (boven), transmissie (midden) en absorbtie (onder) van straling van 10 bladeren uit de top van het bladerdek van 5 plantensoorten, afhankelijk van de golflengte; naar: Wolfe & Zisis (1985) p 3-134 t/m 3-137.

overdrachtsefficiëntie te prefereren als verhitting (doorstraling) van dikkere plantendelen beoogd wordt (Kurstjens, 1999). Uiteraard is bij gelijkblijvende stralingsintensiteit de blootstellingstijd voor opwarming van dikke plantdelen tot een zekere temperatuur groter dan die voor blad. Als één bladlaag reeds het grootste deel van de absorbeerbare straling opvangt, zal de straling weinig effect hebben op bladeren die door andere worden beschaduwd. Een andere reden dat een plant niet gelijkmatig verhit zal worden door straling

is dat de door straling af te leggen weg in de plant sterk uiteenloopt vanwege de geometrie van de plant. Met name rechtopstaande bladeren en stengels zullen relatief weinig straling opvangen van een van bovenaf werkende straler. Om gelijkmatige verhitting van planten te bevorderen lijkt het, analoog aan verhitting van dikkere plantdelen, ook zinvol om voor hogetemperatuurstralers te kiezen.

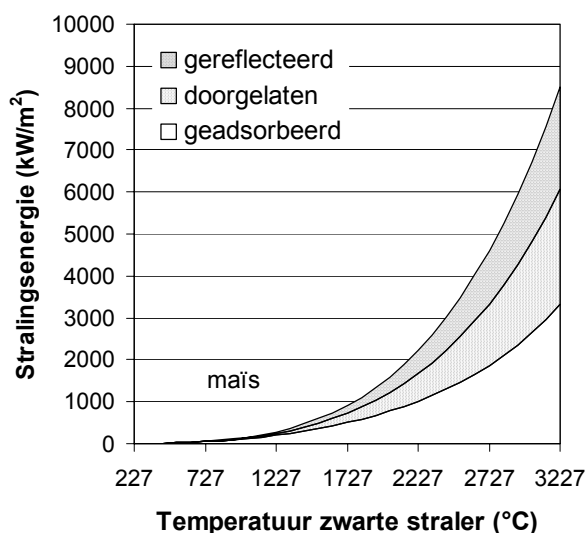
#### Absorptie van straling en overdrachtsefficiëntie in relatie tot de stralertemperatuur

Door de gegevens over absorptiespectra van plantaardig materiaal en het emissiespectrum van stralers te combineren kan de totale absorptie en de efficiëntie van de stralingsabsorptie worden berekend in relatie tot de stralertemperatuur. Als voorbeeld zijn de uitkomsten van deze berekeningen voor maïsblad weergegeven in figuren 3.6 en 3.7. Uit de berekeningen blijkt dat de totale absorptie van straling door maïsblad toeneemt met de stralertemperatuur maar dat de overdrachtsefficiëntie afneemt.

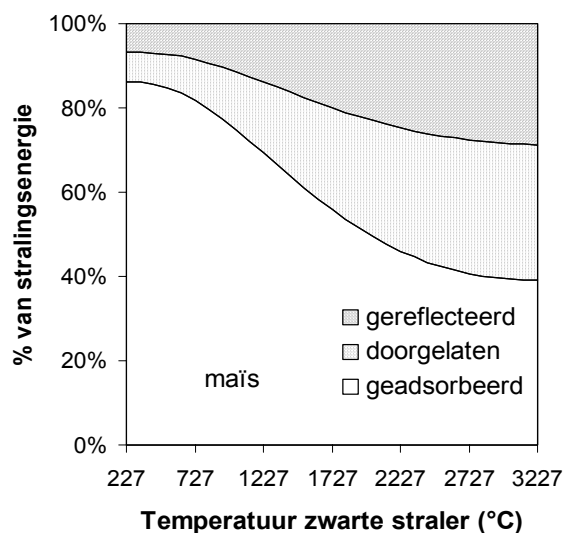
#### De vereiste stralingsdosis voor onkruiddoding

Empirische gegevens over het effect van stralingsintensiteit, blootstellingsduur en spectrale verdeling op de benodigde stralingsenergie om planten te doden zijn zeer schaars en de dodelijke stralingsdoses die in literatuur worden gegeven lopen sterk uiteen van ca 20 tot 2.600 kJ/m<sup>2</sup> (Kurstjens, 1999).

Eén van de redenen voor deze grote verschillen is de weinig objectieve beoordeling of de planten dood zijn of alleen visuele schade hebben opgelopen. Kurstjens & Vermeulen (2000) onderzochten de dosis-effectrelatie van infrarodestraling bij gele mosterd (*Sinapsis alba* L.) in het vroege twee-bladstadium, gebruikmakend van een 2 kW elektrische straler met elliptische reflector (stralertemperatuur ca 2.400°C; piekgolflengte 1.200 nm; stralingsintensiteit 25



Figuur 3.6 Berekende totale adsorptie, reflectie en transmissie van de door een vlakke, zwarte straler geproduceerde straling door maïsblad in relatie tot de stralertemperatuur.



Figuur 3.7 Berekende fracties van de door een vlakke, zwarte straler geproduceerde straling die door maïsblad gereflecteerd, doorgelaten en geabsorbeerd worden in relatie tot de stralertemperatuur.

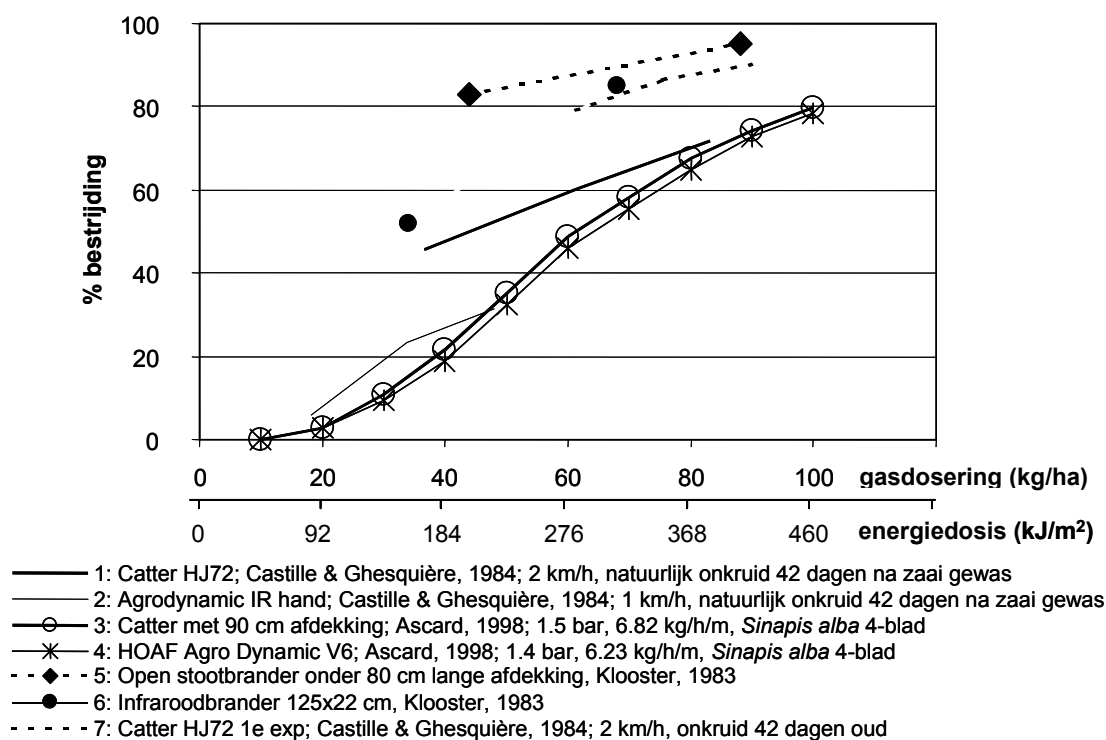
$\text{kW/m}^2$  ter hoogte van de planten). Het bestrijdingseffect werd 13 dagen na behandeling gemeten volgens 4 methoden: telling van planten met > 95% van het bladoppervlak afgestorven; telling van planten met afgestorven groeipunt; versgewichtschaade (= % afgestorven levend weefsel) en groeireductie. De effectieve dosis (50% van het effect bereikt) liep enorm uiteen; van 189 tot  $960 \text{ kJ/m}^2$ , afhankelijk van de gebruikte effectparameter. De benodigde dosis voor 95% versgewichtschaade was ongeveer  $300 \text{ kJ/m}^2$ .

Een andere reden is het verschillende uitgangsmateriaal. Zo onderzocht Parish (1989) de benodigde hoeveelheid straling voor het doden van gele mosterd en raaigras met een buisvormige kwartslamp (stralertemperatuur  $950^\circ\text{C}$ ; piek-golflengte  $2.600 \text{ nm}$ ; stralingsintensiteit  $33,3 \text{ kW/m}^2$ ). Een stralingsdosis van  $200 \text{ kJ/m}^2$  was dodelijk voor kiemplanten van gele mosterd (4 cm hoog; 9 dagen na zaai). Voor het doden van raaigras in het driebladstadium was  $400 \text{ kJ/m}^2$  nodig.

### Energieverbruik

Er zijn enkele experimenten uitgevoerd waarin het onkruidbestrijdend effect van stootbranders en gasgestookte infraroodstralers vergeleken werd en waarbij ook het energieverbruik waargenomen werd. In figuur 3.8 zijn de bestrijdingseffecten weergegeven in relatie tot het gasverbruik.

Castille & Ghesquière (1984) vergeleken een handbediende Agrodynamic IR-straler en een Catter HJ72 afgedekte brander met rijnsnelheden van resp. 1 en 2 km/h, drie gasdrukken en relatief oude onkruiden (42 dagen na zaai van het gewas). Zij concludeerden dat de IR-



Figuur 3.8 De effectiviteit van afgedekte stootbranders (vette lijnen) en infraroodstralers (dunne lijnen) in relatie tot hun gasverbruik.

brander minder efficiënt was dan de open brander, maar doelden daarbij waarschijnlijk niet op de dosis-respons relatie. Het vermogen van de branders verschilde sterk (het gasdebiet van de Agrodynamic IR en de Catter HJ72 was resp. 0,75 en 3,75 kg/h bij 2 bar). Uit figuur 3.7 blijkt dat het verschil in respons vooral op de gasdosis terug te voeren is.

Ascard (1998) vergeleek een Catter brander (gasverbruik 6,82 kg/h per meter werkbreedte bij 1,5 bar; 90 cm lange afdekking) met een HOAF Agrodynamic V6 infraroodstraler (gasverbruik 6,23 kg/h per meter werkbreedte bij 1,4 bar; 100 cm lange straler) bij 6 rijnelheden van 0,5 tot 12 km/h. Gele Mosterd (*Sinapis alba* L.) werd behandeld in 3 stadia (kiemplant, 0-2 blad, 4 blad) bij droge weersomstandigheden. Bij het 4 blad stadium kwamen de dosis-respons curven overeen (figuur 3.8). Hoewel het hoofdprincipe verschilt, wordt in beide machines zowel straling als convectie benut voor de bestrijding. Omdat de bijdragen van straling en convectie 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 (1995, 1998) onderkent ook dat vergelijking complexer is dan op het eerste gezicht kan worden verwacht, omdat niet alle soorten identiek reageren.

Ondanks de methodologische problemen menen Ascard (1995), Castille & Ghesquière (1984), Geier (1987), Klooster (1983), Nyström & Svensson (1988) en Hege (1989) dat gasgestookte infraroodstralers inferieur zijn ten opzichte van overkapte stootbranders wat betreft effectiviteit, energie-efficiëntie, capaciteit en kosten. De dosis-respons curven in figuur 3.8 geven echter geen duidelijke aanleiding tot een dergelijke conclusie wat de betreft de combinatie van effectiviteit en energie-efficiëntie (dosis-respons) van gasgestookte stralers. De modernste stootbranders zijn echter zowel efficiënter dan de stootbranders als dan de gasgestookte IR-stralers gebruikt in de beschreven proeven. Energie-overdracht op een vlakke ondergrond door middel van elektrische stralers is energetisch minder efficiënt dan stootbranden (Kurstjens & Vermeulen; 2000), met name als met het conversieverlies van diesel naar elektriciteit rekening wordt gehouden.

#### *Potentieel van infraroodstraling voor toepassing op verharding*

Evenals bij stootbranders is het ook bij toepassing van infraroodstraling op verharding vooral van belang dat de afmetingen van de apparatuur beperkt blijven, maar dat toch een zo hoog mogelijke capaciteit gehaald wordt. Dit betekent dat de stralingsintensiteit, dus ook de stralertemperatuur, zo hoog mogelijk gekozen zou moeten worden. Dit gaat overigens in het algemeen ten koste van het energetisch rendement.

Bij vlakke gasgestookte infraroodstralers is de maximaal praktisch haalbare stralertemperatuur ca 1.000°C. De stralingsintensiteit vlak onder de straler is dan theoretisch ca 150 kW/m<sup>2</sup>, geen rekening houdende met verliezen. De rijnelheid met een 1 m lange gasgestookte straler bij een stralingsdosis van 200 kJ/m<sup>2</sup> (kiemplanten, klein onkruid) zou dan ca 2,7 km/h zijn. Het energetisch rendement zal hierbij in de orde van grootte van 60% liggen.

Bij elektrische infraroodstralers is de stralingsintensiteit onder een rij buisvormige stralers in de orde van grootte van 30 kW/m<sup>2</sup>. De rijnelheid met een 1,0 m lange elektrische straler bij een stralingsdosis van 200 kJ/m<sup>2</sup> wordt dan ca 0,5 km/h. Het energetisch rendement (van diesel naar straling) zal hierbij in de orde van grootte van 20% liggen.

De mogelijke indringing van infraroodstraling in de plant is een potentieel aantrekkelijke eigenschap voor het bestrijden van planten met verborgen groeipunten of dieper liggende



weefsels. Op grond van de uitdemping van de stralingsintensiteit in dikker materiaal mag echter verwacht worden dat de capaciteit meer dan proportioneel afneemt met de dikte van het te behandelen materiaal.

Een potentieel aantrekkelijke eigenschap van met name elektrische stralers is de mogelijkheden om de stralingsintensiteit hoog op te voeren door hoge stralertemperaturen en focussing toe te passen. Kurstjens & Vermeulen (2000) rapporteren een stralingsintensiteit van  $125 \text{ kW/m}^2$  in het brandpunt van een elliptische spiegelreflector. Omdat straling kan worden gericht en gefocusseerd op bepaalde doelgebieden, is in principe gedeeltelijke verhitting van onkruidplanten (paragraaf 3.3.1) en pleksgewijs werken (zie ook hoofdstuk 4) mogelijk.

Een nadeel van infraroodstraling is dat de uitgestraalde energie die niet door planten is geabsorbeerd niet, zoals bij stootbranden, opnieuw kan worden hergebruikt.

## Infraroodstraling: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

Een hoge stralingsintensiteit onder de kap is gewenst voor onkruidbestrijding op verharding, eventueel ten koste van de energie-efficiëntie. Bij gasgestookte stralers is de praktisch haalbare stralertemperatuur ca 1.000°C bij een vermogensdichtheid van 250 kW/m<sup>2</sup>. Hiervan komt ca 125 kW/m<sup>2</sup> als infraroodstraling beschikbaar en de rest als hete lucht. Bij hogere stralertemperaturen, door plaatsing van meer of grotere branders, loopt men aan tegen technische grenzen van hittebestendigheid van de constructie. Een nadeel is dat de hete lucht minder effectief gebruikt kan worden dan bij stootbranden vanwege de lagere maximale luchttemperatuur en minder mogelijkheden om luchtturbulentie op te wekken.

Elektrische IR-stralers bereiken een temperatuur van ca 2.300°C en daarmee een hoge stralingsintensiteit aan het oppervlak van de gebruikte kwartsbuislampen. Echter, bij afbuiging en verdeling van de straling over een vlakke ondergrond blijft slechts een stralingsintensiteit van ca 25-35 kW/m<sup>2</sup> over. Dit gegeven, het energieverlies (ca 70%) bij omzetting van diesel naar elektriciteit en ook de schokgevoeligheid maken elektrische stralers ongeschikt voor volvelds gebruik op verharding.

### Bestrijdingseffectiviteit

Er is sprake van een energie dosis-respons curve; bij toenemende energiedosis wordt een steeds groter deel van de bovengrondse plantendelen gedood. Er zijn een groot aantal onkruiden die na branden hergroei vertonen, afhankelijk van de dosis.

### Inzetmogelijkheden

Inzet op vlak terrein is het gehele jaar door mogelijk, maar effectiever onder droge omstandigheden. Inzet rond obstakels ligt, zonder focusering van de straling, minder voor de hand omdat eventuele handbranders volgens dit principe te zwaar zouden worden.

### Productiviteit

Cijfers zijn niet bekend, maar door de relatief lage stralingsintensiteit en slechtere overdracht van energie op de planten zal de productiviteit achterblijven bij stootbranden. In theorie, bij toepassing van alléén IR-straling, is de productiviteit 41% van die van stootbranden (zie tabel 3.1). Echter in de praktijk wordt ook warmte overgedragen door convectie. De haalbare productiviteit wordt daarom geschat op 60% van de stootbrander.

### Milieu

Bruto fossiel energieverbruik: 600-2.000 kJ/m<sup>2</sup>, geschat op basis van de rendementen van gasgestookte stralers.

### Veiligheid/neveneffecten

Voldoende veilig voor de mens mits aan de veiligheidsvoorschriften voldaan wordt. Onder droge omstandigheden gevaar voor bos- of grasbrand. Gevaar voor smelten van asfalt. Door contact van groot onkruid met de stralers en roosters, kan de machine beschadigen.

### Kosten

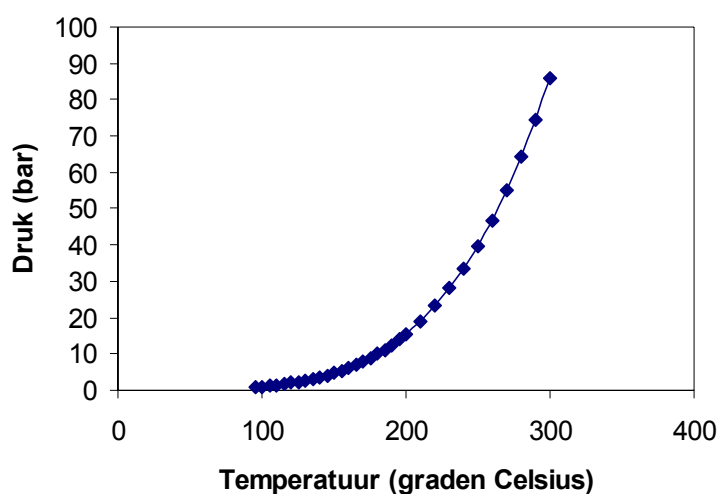
Op basis van de verwachte productiviteit en de investeringen worden de kosten geschat op 0,05 €/m<sup>2</sup> bij weinig onkruid tot 0,10 €/m<sup>2</sup> bij veel onkruid.

### 3.1.3 Heet water en stoom

Verhitten van planten via stoom of warm water is een convectief warmte-overdrachtsproces. Water en stoom (verzadigde waterdamp) hebben grotere soortelijke warmten (bij gelijkblijvende druk en bij gelijkblijvend volume) dan droge, atmosferische lucht en zijn dus in staat per volume-eenheid en per graad temperatuursverandering meer energie tot vlak bij de plant te transporteren. Bij lage turbulentie is de energie-overdrachtscoëfficiënt van water naar blad groter dan van lucht of verzadigde waterdamp omdat de warmtegeleiding (naar het grensvlak met de plant) in water een factor 25-35 hoger is dan in lucht. Dit hoeft niet te gelden bij een turbulente lucht- of dampstroom rond de plant omdat de lucht bij het grensvlak dan snel 'ververst' wordt. Een nadeel van heet water en stoom onder atmosferische omstandigheden is, dat het temperatuurverschil met de planten relatief klein is in vergelijking met de hete gassen van een stootbrander. Hierdoor wordt de snelheid van warmte-overdracht negatief beïnvloed. De maximum temperatuur van heet water onder atmosferische omstandigheden is 100°C.

Door spuiten van oververhit water onder druk kan een hogere temperatuur gehaald worden (Figuur 3.9). Boven het verhitte water in de drukketel en bij de uittreding van het water uit de spuitdop ontstaat dan stoom. Door de omzetting van water naar waterdamp daalt de temperatuur van stoom onder atmosferische omstandigheden weer snel naar 100°C. Bij eventuele toepassing van stoom zou het oververhitte water daarom zo snel mogelijk na uittreden in contact met het onkruid moeten komen. Bij gebruik van stoom moeten de veiligheidseisen, genoemd in de stoomwet, nageleefd worden.

Omstreeks 1996 werd het Nieuw-Zeelandse Waipuna heetwatersysteem als eerste door de firma Jongerius uit Utrecht op de markt gebracht. Kortenhoff *et al.* (2001b) geven een beschrijving van aangepaste en verbeterde heetwaterapparatuur voor onkruidbestrijding op verhardingen, gebouwd door de firma Van de Haar in Wekerom. De apparatuur bestond uit een waterreservoir (inhoud 1.000 l), een verwarmingsunit en een hogedrukpomp (150 bar). Het water wordt onder relatief lage overdruk op hoge temperatuur gebracht (ca 140°C) en vervolgens onder hoge druk door een slang naar een spuitdop verpompt. De spuitdop is ingebouwd in een afscherm- en verdeelkap (ca 30 x 30 cm), die met de hand, middels een lans en een steunrol, juist boven de veronkruidde bestrating kan worden (heen en weer)



Figuur 3.9 Verzadigde waterdruk in relatie tot de temperatuur.

bewogen. Als het water de spuitdop verlaat is de temperatuur volgens opgaaf ca 94°C. Het merendeel van het water zal daarom de planten onder de verdeelkap bereiken als heet water en niet als stoom of verzadigde waterdamp. Bij meer recente apparatuur wordt een uittredetemperatuur van even boven de 100°C gespecificeerd.

Groeneveld (2000) onderzocht het bestrijdingseffect van heet water oriënterend in de praktijk. Het directe effect van een bestrijding in oktober varieerde van 50 tot 90% bestrijding (op basis van bedekkingsgraad). Met name grassen vertoonden na ongeveer een maand weer volledige hergroei. Als benodigde behandelfrequentie werd door de fabrikant tenminste 2 keer per jaar aangegeven. Hekman (2000) monitorde de onkruidsituatie bij een praktijkproef in een wijk van de gemeente Ede. De resultaten, in vergelijking met glyfosaatbehandeling, waren bemoedigend. Het langere termijneffect werd echter niet door hem onderzocht. Hansson & Ascard (2002) bestreden gele mosterd in het 2 blad en het 6 blad stadium met heet water. Bij een energiedosis van 340 kJ/m<sup>2</sup> werd 90% versgewichtschade in het 2 blad stadium gemeten. Voor hetzelfde effect was in het 6 blad stadium 3 keer zoveel energie nodig. Hansson & Ascard (2002) voerden ook experimenten uit met natuurlijk ontstane begroeiing op halfverharding (gravel). Een energiedosis van 960 kJ/m<sup>2</sup> gaf 90% bestrijding na 7 dagen, afnemend door hergroei tot 65% na 14 dagen. Een dosis van 1430 kJ/m<sup>2</sup> was nodig om 90% bestrijdingseffect na 14 dagen te bereiken. Na drie tot vier weken was de onkruidbezetting bij beide doses vrijwel gelijk, door het opnieuw uitlopen van ondergrondse onkruiddelen. De benodigde bestrijdingsfrequentie was gemiddeld 1 keer per 25 dagen, gelijk aan het benodigde interval bij stootbranden.

Op basis van de praktijkgegevens van Hoksbergen (2000) en Geffen (2001) varieert de productiviteit bij de heetwaterbehandeling van 110 m<sup>2</sup>/h bij zware onkruidbezetting en veel obstakels tot 450 m<sup>2</sup>/h bij lichte onkruidbezetting en weinig obstakels. Het fossiel energieverbruik varieerde van ongeveer 290 kJ/m<sup>2</sup> bij lichte onkruidbezetting tot 2.240 kJ/m<sup>2</sup>, met uitschieters tot 3.700 kJ/m<sup>2</sup>, bij zware onkruidbezetting en veel obstakels. Het waterverbruik varieerde van 1 tot 8 liter per m<sup>2</sup> verharding. Momenteel beschikt Jongerius ook over een heetwatermachine met roterende spuitdoppen, gebouwd voorop een trekker. Gegevens over de productiviteit en het energieverbruik van deze machine zijn nog niet bekend. Door het verlaten van het principe van pleksgewijs behandelen zal het energieverbruik per m<sup>2</sup> verharding bij deze grotere capaciteit machine waarschijnlijk hoger zijn dan bij de handapparatuur.

Een variant van dit principe is er een waarbij de te behandelen plek beter van de omgeving wordt geïsoleerd, zodat de energie-inhoud van water of stoom beter benut wordt voor het verwarmen van de plantendelen. Uitvoeringsvormen hiervan zijn:

- Een isolerende deken van enkele meters lang die achter de toedieningsorganen van water of stoom wordt meegesleept en de behandelde oppervlakte enige tijd afdekt. (AquaHeat, 5155 East River Road, Suite #405, Fridley MN 55421, USA). Gezien het belang van een goede wendbaarheid van de machines op verharding lijkt dit echter een onpraktische maatregel.
- Toevoeging van schuimvormers aan het water. Hoksbergen rapporteerde dat dit bij de Waipuna een aanzienlijke daling van het waterverbruik (factor 5) mogelijk maakte en daarmee ook een lager energieverbruik (Hoksbergen, 2000). In de praktijk is de toevoeging van schuim echter niet aangeslagen.

## Heet water en stoom: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

De maximum temperatuur van heet water onder atmosferische omstandigheden is 100°C. Door spuiten van oververhit water onder druk kan een hogere temperatuur gehaald worden, in principe tot de kritische temperatuur van 374°C (bij een druk van 221 bar). Bij toepassing van oververhit water onder atmosferische omstandigheden daalt de temperatuur zeer snel naar 100°C door verdamping van water. Met name bij hogere drukken zijn zwaar uitgevoerde en streng beveiligde installaties noodzakelijk om aan de veiligheidseisen genoemd in de stoomwet te voldoen. Ten behoeve van pleksgewijs werken lijkt een resolutie van ca 25 x 25 cm mogelijk.

### Bestrijdingseffectiviteit

De dosis-responscurve (Hansson & Ascard, 2002) is afhankelijk van de bedekkingsgraad, de soort en de afmeting van de onkruidplanten. Hekman (2000) monitorde de onkruidsituatie bij een praktijkproef met gangbare apparatuur in een wijk van de gemeente Ede. De resultaten, in vergelijking met glyfosaatbehandeling, waren bemoedigend. Het lange termijneffect is nog niet bekend.

### Inzetmogelijkheden

Inzetmogelijkheden zijn, afhankelijk van de vormgeving van de machine, vrijwel universeel. Er is geen brandgevaar bij paden in natuurgebieden of op sterk veronkruidde plekken. Bij toepassingen op niet-verharde grond kan het gewicht van het meegevoerde water, en in afgelegen locaties kan de watervoorziening een probleem zijn. Er is geopperd dat de effectiviteit kleiner is bij nat weer, maar dat is nog niet experimenteel bevestigd.

### Productiviteit

Op basis van de praktijkgegevens van Hoksbergen (2000) en Geffen (2001) varieert de productiviteit bij heetwaterbehandeling met handapparatuur van 110 m<sup>2</sup>/h bij zware onkruidbezetting en veel obstakels tot 450 m<sup>2</sup>/h bij lichte onkruidbezetting en weinig obstakels. Opvoeren van de capaciteit is mogelijk door grotere units en/of potentieel door toepassing van stoom.

### Milieu

Het fossiel energieverbruik varieert momenteel van ongeveer 290 kJ/m<sup>2</sup> bij lichte onkruidbezetting tot 2.240 kJ/m<sup>2</sup>, met uitschieters tot 3.700 kJ/m<sup>2</sup>, bij zware onkruidbezetting en veel obstakels. Het waterverbruik varieert van 1 tot 8 liter per m<sup>2</sup> verharding. Bij vergroting van de capaciteit (grotere units) zal het energieverbruik per m<sup>2</sup> verharding toenemen. Voor verlaging van het energieverbruik zijn er mogelijkheden door betere isolatie van de water/stoombron van de omgeving door bijv. een sleepdoek of schuim. Milieueffecten van de toevoeging van schuimvormers zijn nog niet onderzocht.

### Veiligheid/neveneffecten

De veiligheid voor publiek en werkers kan gewaarborgd worden door de bestaande regels in acht te nemen. Stoomwolken (verkeer, passanten) kunnen optreden en als een ongewenste bijwerking worden beschouwd. Een neveneffect kan zijn dat het toegediende water de hergroei onder droge omstandigheden kan bevorderen.

### Kosten

De kostprijs varieert van 0,17-0,68 €/m<sup>2</sup> voor handapparatuur. Door groter units kan dit dalen tot, naar schatting, 0,10-0,25 €/m<sup>2</sup>.

### 3.1.4 Contactoverdracht

Een niet eerder geopperd bestrijdingsprincipe is verhitting van het onkruid door direct contact met een heet voorwerp (strijken), bijvoorbeeld een wals, een staaf of een stempel. Een uitvoeringsvorm zou een deels isolerend afgeschermd cilinder kunnen zijn die over of net boven de verharding rolt, eventueel met schrapers voor verwijdering van aanklevend onkruid. De verhitting van de rol kan bijvoorbeeld met branders, van binnen uit of van buiten af. Bovengrondse plantendelen worden door de rol geplet en door straling en contactoverdracht verhit. Mogelijkerwijs is strijken zeer efficiënt in een situatie met grote, boven een vlakke ondergrond uitstekende onkruidpollen; de cilinder heeft dan alleen intensief contact met de pollen. Een mogelijkheid is ook om onbenutte hete gassen van een stootbrander te gebruiken om een strijkend machine-onderdeel te verhitten.

## Contactoverdracht: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

Een stalen rol of plaat kan door branders verhit worden. De maximale temperatuur zal daarbij ca 600°C kunnen zijn. Daarboven wordt het staal week en technisch minder bruikbaar als machineonderdeel. Uitoefening van druk op de rol is op vele manieren mogelijk. Pleksgewijs werken kan, bijvoorbeeld door de rol of plaat op te tillen als er geen onkruid staat. De resolutie is dan afhankelijk van de maatvoering van de machine.

### Bestrijdingseffectiviteit

Dosis-effectcurven zijn niet bekend. Een gunstig effect zou kunnen zijn dat het onkruid geplet wordt als de zware rol erover gaat, zodat dikkere plantdelen en groeipunten intensiever verhit worden, door de rol zelf of een eventueel volgende open vlam. Bij onderzoek dienen de temperatuur, het verwarmend vermogen, de blootstellingsduur, de hoogte boven het oppervlak c.q. de druk van het hete oppervlak op de grond, en eventuele extra onderdelen (zoals vlakstrijkers of loskrabbers) gevarieerd te worden.

### Inzetmogelijkheden

Te denken valt aan een stalen rol of sleepplaat voor vlakke ondergronden (grote oppervlakten verharding of halfverharding) en relatief kleine ronde platen of kubussen aan een steel voor handwerk rond obstakels en in goten.

### Productiviteit

Hierover is niets bekend.

### Milieu

Er kan een milieuvriendelijke wijze van verwarming worden gekozen waarbij de uiteindelijke verbranding van fossiele energie zo volledig mogelijk geschiedt. Door de cilinder over een groot deel van de omtrek binnen een isolerende overkapping te laten bewegen, en de cilinder zelf niet in contact met het oppervlak te laten maken, kunnen energieverliezen naar de omgeving beperkt worden. De energieoverdracht op het onkruid zou daardoor efficiënter kunnen zijn dan bij stootbranden. Voor kwantificering is echter onderzoek nodig.

### Veiligheid/neveneffecten

Brandgevaar, rook en/of schroeilucht onder droge omstandigheden zijn niet uitgesloten. Het verhardingsoppervlak komt mogelijk gedurende korte tijd in direct contact met het verwarmde oppervlak. Steenachtige materialen zullen hier geen schade van ondervinden. Sierbestrating en/of asfalt kan eventueel gekoeld worden door verneveling van water.

### Kosten

Onbekend. Verwacht wordt dat met name de combinatie met stootbranden effectief zou kunnen zijn en tot lage kosten per m<sup>2</sup> kan leiden.

### 3.1.5 Elektrocutie en elektroporatie

Elektrocutie berust op het principe van het aanraken van de bovengrondse plantendelen met een aan een hoge spanning liggende elektrode (waarbij de aarde de andere elektrische pool vormt), door twee tegengesteld gepoolde elektroden of door vonkoverslag. De elektrische stroom die door de plantendelen loopt verhit deze waardoor beschadiging optreedt.

Daarnaast is de methode waarbij vonkoverslag optreedt effectief door de drukgolf die ten tijde van de overslag ontstaat, en de korte maar sterke elektrische stroom die plaatselijk zeer hoge temperaturen veroorzaakt (Kurstjens, 1998). Dat deze methode niet altijd tot volledige doding leidt moge blijken uit het feit dat planten en bomen vaak blijven leven na blikseminslag!

Diprose *et al.* (1985; referentie naar Diprose & Benson, 1984) ontwikkelde elektrocutieapparatuur met een vermogen van 54 kW voor bestrijding van onkruid en onkruidbieten in een 12-rijige machine. Bij een lichte tot matige bezetting met onkruidbieten werd een capaciteit gehaald van 2,4 ha/h. De benodigde energie om een plant te doden hing sterk af van de soort, de grootte en de leeftijd (houterigheid). Uit proeven met deze apparatuur voor landbouwtoepassing blijkt een redelijke bestrijdingseffectiviteit, hoge productiviteit en laag energieverbruik. Onduidelijk bleef of ook de plantenwortels verhit worden. Zaden werden goed bestreden; 90% minder kiemkrachtige zaden. Om één 1-1,5 m hoge plant te beschadigen was ca 70 kJ nodig bij een spanning van 8,4 kV. De genoemde 12-rijige machine gebruikte tussen de 4 en 10 liter diesel per ha.

Het energiegebruik bij elektrocutie is waarschijnlijk lager dan bij afbranden (Kaufmann & Schaffner, 1982; Vigneault *et al.* 1990 in Ascard, 1995). De apparatuur is echter kostbaar, al is er een dalende tendens voor de prijs van vermogenselektronica. Elektrische bestrijding kan ook ingezet worden bij wind of lichte regen en kent geen residu (Kurstjens, 1998). Voor de veiligheid moet aan een aantal voorwaarden voldaan worden, omdat de hoge spanningen levensgevaarlijk zijn.

Bij elektroporatie berust het werkingsprincipe hierop, dat de structuur van een plantencel in een zeer snel van polariteit wisselend elektrisch veld beschadigd raakt doordat de celkernen door de celwanden heen getrokken worden. Dit kan worden opgewekt door plantendelen in een zeer sterk veld van wisselspanning met een blokgolfkarakter (bijvoorbeeld tussen twee condensatorelektroden) te brengen. Deze methode staat nog in de (laboratorium) kinderschoenen (Fogelberg, 2000). Op deze plaats zal verder niet op elektroporatie worden ingegaan vanwege de nog te grote onzekerheden.

## Elektrocutie: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

Praktisch gezien ligt toepassing van één elektrode met hoge spanning en de verharding als aarding het meest voor de hand vanwege de doorgaans beperkte hoogte van onkruid op verharding. Van cruciaal belang is de kleinst, praktisch haalbare afstand tussen de elektroden en de verharding in verband met het treffen van vlakgroeiend onkruid en korte grassoorten. In de bestudeerde literatuur (beperkte studie) werd hierover geen informatie aangetroffen. Besturing van de elektroden, in combinatie met onkruiddetectie, kan leiden tot pleksgewijze behandeling met een resolutie die afhangt van de grootte van de elektroden.

### Bestrijdingseffectiviteit

Gelet op de proeven van Diprose *et al.* (1985) lijkt een redelijke bestrijdingseffectiviteit, in het bijzonder ook voor zaden, haalbaar. Dit geldt echter alleen voor onkruid dat werkelijk met de elektroden in contact kwam.

### Inzetmogelijkheden

Inzetmogelijkheden zijn er met name op vlakke ondergrond en wellicht in goten. Handbediende apparatuur voor rond obstakels lijkt in eerste instantie gevaarlijk, mede omdat sommige obstakels zeer goede tegenpolen zijn (bij stalen palen). Elektrische bestrijding kan ook ingezet worden bij wind of lichte regen en kent geen residu (Kurstjens 1998).

### Productiviteit

Bij landbouwtoepassing werd bij een lichte tot matige bezetting met onkruid een hoge capaciteit gehaald van 2,4 ha/h met een 54 kW machine. Op grond hiervan wordt ook een potentieel hoge productiviteit op vlakke verharding verwacht, mits effectief werken mogelijk blijkt.

### Milieu

Het energiegebruik is waarschijnlijk lager dan afbranden (Kaufmann & Schaffner, 1982; Vigneault *et al.* 1990 in Ascard, 1995). In de proeven van Diprose *et al.* (1985) was relatief weinig brandstof nodig: tussen de 4-10 liter diesel per ha voor de bestrijding van onkruid en onkruidbieten tussen de gewasrijen suikerbieten.

### Veiligheid/neveneffecten

Er zal aan een aantal eisen in verband met de brandveiligheid en elektrische isolatie voldaan moeten worden. Het werkingsprincipe zal waarschijnlijk nogal spectaculair zijn, met vonken en geknetter, waardoor het misschien af zal schrikken in urbane gebieden. Er is geen schade aan verhardingen te voorzien. Bij het werken onder dorre omstandigheden is er gevaar voor brand. Toepassing in natuurgebieden vereist daarom voorzichtigheid. Er zal onderzocht moeten worden of onkruid elektrocutie storingen veroorzaakt bij bijvoorbeeld GSM telefoons.

### Kosten

De apparatuur is kostbaar, al is er een dalende tendens voor de prijs van vermogenslektronica. Als de effectiviteit en productiviteit echter hoog zouden blijken te zijn kan dit leiden tot relatief lage kosten per m<sup>2</sup> verharding.



### 3.2 Verhitten van ondergrondse delen; magnetronstraling

Het verhitten van ondergrondse plantendelen door de toepassing van magnetronstraling is een vaak geopperd principe. De straling heeft de eigenschap polaire moleculen, zoals water en vetten, in trilling te brengen waardoor in het materiaal zelf warmte wordt ontwikkeld. Wanneer gesproken wordt over “magnetronstraling”, wordt bedoeld EM straling met één van de vier toegestane frequenties, t.w. 915, 2.450, 5.800 of 24.125 MHz. Hoewel de warmteontwikkeling in het materiaal recht evenredig is met de frequentie, worden eigenlijk alleen de twee laagste frequenties gebruikt omdat alleen voor deze frequenties economische microgolfbuizen (“magnetrons en klystrons”) te fabriceren zijn (Badger, 1970).

Huishoudmagnetronovens beschikken over een zgn. magnetron, een op een radiobuis lijkende trilholte waarin de toegevoerde elektrische energie wordt omgezet in een hoogfrequente wisselspanning. Deze wisselspanning wordt via een “antenne” (golfgeleider) uitgezonden als “magnetronstraling”, EM straling met een frequentie (bij huishoudmagnetrons) rond de 2,5 GHz. Het rendement (van elektriciteit naar straling) van een dergelijke stralingsbron varieert van 30-60%, afhankelijk van de constructie. De uitgestraalde energie wordt o.a. in het water dat aanwezig is in de plant, de plantenwortels en de grond, omgezet in warmte. Het totale rendement van dit proces ligt rond de 40-60%. Beide processen samen (van elektriciteit naar warmte in water) hebben dus een rendement van ongeveer 20% (12-36%; Badger, 1970). Bij een mobiele installatie zal de benodigde elektriciteit bovendien opgewekt moeten worden door bijv. een dieselmotor met een generator. Het rendement van de omzetting van diesel naar elektriciteit is ongeveer 30%. Het rendement van de omzetting van brandstof naar warmte in water is daardoor slechts ca 6%. Helaas gaat ook veel energie verloren in opwarming van de omgeving i.p.v. de plantendelen en de toplaag van de grond. De straling dringt, afhankelijk van bodemvocht en stralingsvermogen de bodem in op een niet controleerbare wijze.

Als indicatie voor het energieverbruik moge de hiernavolgende berekening voor opwarming van alleen de bovenste centimeter van de grond dienen. Bij een dichtheid van  $1.500 \text{ kg/m}^3$  en een vochtgehalte van ca 14% (gew. %; d.b.) bevat de bovenste centimeter van  $1 \text{ m}^2$  bodemoppervlak 2 kg water. Om 2 kg water 50 K in temperatuur te laten stijgen is 420 kJ nodig. Het omzettingsrendement van diesel naar warmte in water is ongeveer 6%. Het fossiele energieverbruik zal daarom ca  $7.000 \text{ kJ/m}^2$  bedragen, hetgeen zeer hoog is vergeleken met branden ( $150\text{-}300 \text{ kJ/m}^2$  op vlak veld; cijfers Kurstjens, 1998). Een indruk van het benodigde vermogen: indien de opwarming van het water in 1 seconde moet gebeuren vraagt dat een netto stralingsvermogen van 420 kW, een opgenomen elektrisch vermogen van ca 2.000 kW (rendement 20%) en een motorvermogen van ca 9.000 pk! Vanuit een energetische beschouwing is het dus vrijwel onmogelijk om voldoende energie te produceren om een snelle opwarming van het bovenste grondlaagje en de plantendelen daarin te realiseren in een mobiele installatie. Daarnaast zijn de veiligheidsaspecten en de toelating van dergelijke installaties door de Rijksdienst voor Radiocommunicatie (RDR) belemmerende factoren.

## Magnetronstraling: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

Onafgeschermd gebruik van magnetronstraling is niet mogelijk. Een open doos, die met de open zijde over de bodem bewogen wordt, geeft een idee van de uitvoeringsvorm.

Teneinde lekkage van de straling langs de randen te voorkomen, is ofwel een zéér nauwe spleet noodzakelijk (< 2 mm), waardoor onkruid de ruimte niet meer in kan, of een brede horizontale rand (25-50 cm), waardoor niet meer langs obstakels gewerkt kan worden. De technische mogelijkheden zijn zeer beperkt doordat de onkruidbestrijding niet in een compleet afgeschermd kooi kan plaatsvinden zoals bij de huishoudmagnetron, zodat enorme hoeveelheden energie verloren gaan als straling en, derhalve, een groot veiligheids- en energieprobleem ontstaat.

### Bestrijdingseffectiviteit

In principe is het mogelijk bovengrondse plantendelen te laten afsterven. De indringing van de magnetronenergie in de bodem, en dus het effect op de wortels, is speculatief en afhankelijk van de bodemeigenschappen en de bodemtoestand. De dosis-responscurve in termen van fossiele energie is zeer ongunstig vergeleken met stootbranden.

### Inzetmogelijkheden

Geen.

### Productiviteit

Bij veilig werken extreem laag.

### Milieu

Door de enorme omzettings- en stralingsverliezen is het energieverbruik extreem hoog.

### Veiligheid/neveneffecten

Een hoogfrequent zender van honderden kilowatts is zeker niet ongevaarlijk, vooral in een frequentiegebied wat water kan opwarmen. Een lekkage van 1% betekent al een vermogen van 10 kW hetgeen een factor 10.000 meer is dan de straling van een GSM telefoon waar

zijn.

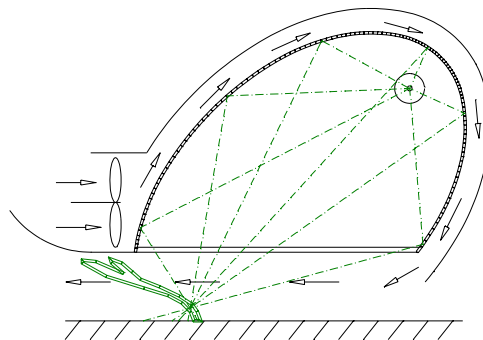
## 3.3 Thermisch afsnijden

Indien slechts een gedeelte van de bovengrondse plantendelen, bij voorkeur de stengelsecties juist boven maaiveld, voldoende worden verhit zal het transport van water en voedingsstoffen naar de hoger gelegen plantendelen worden gehinderd. Dit kan leiden tot afsterven van de bovengrondse delen zonder dat deze delen in zijn geheel verhit zijn geweest. Deze techniek kan tot energiebesparing leiden, alsmede tot capaciteitsvergroting door een hoger werktempo. Om plaatselijke verhitting te bereiken dient de resolutie van de verwarmende energiestroom klein te zijn en dient de energie op nauwkeurig bepaalde plaatsen gericht te worden, m.a.w. de energie dient tot een brandlijn geconcentreerd te worden. In principe zijn er mogelijkheden om dit te bereiken door focussering van IR-straling en door toepassing van laser, dat reeds gefocusseerd opgewekt wordt.

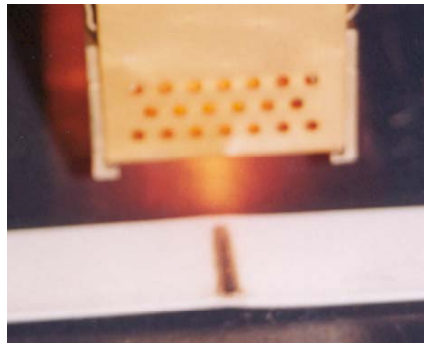
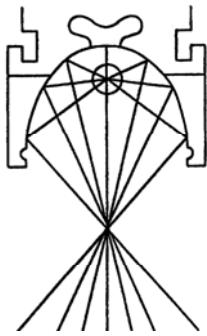
### 3.3.1 Gefocusseerde IR-straling

Focussing van IR-straling is in principe mogelijk door middel van lenzen of spiegels (Figuur 3.10). De IR-straling met de meest gunstige (maximaal geabsorbeerde) golflengte (rond de 2.000 nm) wordt helaas aanmerkelijk geabsorbeerd door glas. Focussing met lenzen of met spiegeloppervlakken achter glas leidt daarom tot aanmerkelijke absorptieverliezen. De focussing dient dus bij voorkeur met frontaal spiegellende oppervlakten van zilver of goud worden verkregen. Omdat ook spiegels niet de volle 100% energie weerkaatsen worden deze warm, hetgeen de oxidatie van het spiegeloppervlak versnelt en het weerkaatsende vermogen vermindert. Dit leidt tot het gebruik van vergulde, (water)gekoelde spiegels hetgeen e.e.a. echter niet eenvoudiger maakt.

De relatie tussen stralingsdosis en bestrijdingseffectiviteit van gefocusseerde IR-straling in gele mosterd (2-blad stadium) werd onderzocht door Kurstjens & Vermeulen (2000). Er werd een elektrische infraroodstraler met een elliptische reflector (IRT LE500-2kW) gebruikt, die een brandlijn heeft met een piek-stralingsdichtheid van  $125 \text{ kW/m}^2$  (Figuur 3.11). Bij de hoogst toegepaste energiedosis van  $528 \text{ kJ/m}^2$ , d.w.z. ongeveer 2,1 Joule per plant, overeenkomend met bestraling gedurende ca 5 s, verwelkten 50% van de planten onder de (vochtige, doorgaans bewolkte) proefomstandigheden. Daarbij wordt aangetekend dat onder normale omstandigheden alle planten doodgegaan zouden zijn. Het punt dat de stengel volledig wordt doorgesneden werd echter niet bereikt. Voor een goede werking van de opstelling in figuur 3.10 is volledig doorsnijden noodzakelijk. Ook de bestralingstijd moet zeer kort zijn, bijv. in de orde van 0,1 s, om een realistische voortgangssnelheid te bereiken. Hieruit valt op te maken dat de stralingsdichtheid van een adequaat werken 'IR-mes' tenminste groter dan ca  $6.000 \text{ kW/m}^2$  zou moeten zijn. Omdat elektrische IR-stralers, die de hoogste temperatuur van het stralend oppervlak hebben (ca  $2.300^\circ\text{C}$ ), zelfs vlak bij het stralend oppervlak in theorie een maximale stralingsdichtheid van ca  $2.500 \text{ kW/m}^2$  vertonen, is realisatie van een adequaat 'IR-mes' in de praktijk onwaarschijnlijk.



Figuur 3.10 Concept van een elektrische straler met een elliptische, luchtgekoelde reflector die 83% van de uitgezonden straling focuseert op de brandlijn, waar de planten worden verhit (Kurstjens, 1999b). De hete lucht buigt de planten voorover en blaast afgeschroeide delen weg.



Figuur 3.11 Schematisch effect van de elliptische reflector (links) in het experiment van Kurstjens & Vermeulen (2000) en demonstratie van de brandlijn op een plastic veldlabel (rechts).

## Gefocusseerde IR-straling: mogelijkheden en beperkingen

### Technische mogelijkheden

Elektrische infraroodstralers met een concave spiegel zijn verkrijgbaar. Zij vormen een brandlijn. Technische problemen zijn de schokgevoeligheid, de afscherming van vuil en het feit dat bij een voortgaande beweging de reeds afgesneden planten verwijderd moeten worden, zodat de straling de nog onbehandelde planten kan bereiken. De voor volledig afsnijden benodigde stralingsdosis per plant is zodanig dat met de huidige elektrische stralers, die een brandlijn hebben, de plant meer dan 5 s bestraald moet worden. Zelfs theoretisch is het onwaarschijnlijk dat een 'IR-mes' ontwikkeld kan worden dat de planten in zeg 0,1 s kan afsnijden. De technische mogelijkheden zijn dus zeer beperkt.

### Bestrijdingseffectiviteit

Mits het onkruid tot dicht bij de verharding afgesneden kan worden, zal de effectiviteit van afsnijden waarschijnlijk vergelijkbaar zijn met borstelen.

### Inzetmogelijkheden

Geen.

### Productiviteit

Zeer laag. Het feit dat onkruid op verhardingen vaak niet een goed gedefinieerde stengel heeft, maar de vorm heeft van een pol of een rozet, zou betekenen dat de doorsnijdingsdikte zeer toeneemt, hetgeen de productiviteit extra verlagen zal.

### Milieu

Het energieverbruik per plant kan laag zijn omdat alleen de stengel doorgesneden wordt. Het totale fossiele energieverbruik zal echter, door het lage conversierendement van brandstof naar IR-straling, waarschijnlijk in dezelfde orde van grootte liggen als bij stootbranden.

### Veiligheid/neveneffecten

Veilig werken lijkt mogelijk mits aan de brandveiligheidseisen voldaan wordt.

### Kosten

Onrealistisch hoog.

### 3.3.2 Laser

Lasers worden gebruikt in kantoren en industrie om materialen plaatselijk te verhitten (bijv. printers), te graveren of te snijden. Naarmate het vermogen groter is kunnen dickere materialen gesneden worden en kan sneller gewerkt worden, maar wordt de uitvoering onhandiger voor mobiele toepassingen. Lasers tot 500W outputvermogen worden voor diverse toepassingen algemeen gebruikt.

Het gebruik van lasers voor het verhitten van zeer kleine gedeelten van bovengrondse plantendelen, analoog aan de toepassing van IR-straling, is eveneens een theoretische mogelijkheid. In dit geval is geen sprake van een brandlijn, maar van een brandpunt, normaliter met een diameter kleiner dan 7 mm. In tegenstelling tot IR-stralers is er bij lasers sprake van monochromatische straling, d.w.z. dat de straling een nauw golflengtegebied heeft. Dit biedt in principe mogelijkheden om die golflengte(n) te kiezen die maximaal door de stengel geabsorbeerd wordt. Geschikt lijken vooral CO<sub>2</sub> lasers met een golflengte van 9-10  $\mu\text{m}$ , in het infrarode gebied.

Proeven in het laboratorium (Heisel *et al*, 2001) toonden aan dat met een CO<sub>2</sub> laser stengels van *Chenopodium album*, *Sinapis arvensis* en *Lolium perenne* konden worden afgesneden met een laserstralingsdosis vanaf 6 J mm<sup>-1</sup>. Voor de proeven is een 50 W CO<sub>2</sub> laser gebruikt, die werd ingesteld op vermogens van 4, 10 en 20 W en een voortbewegingssnelheid van 1,5 en 10 mm/s. De laserstraal was gefocuseerd en de plantenstengels werden onder een hoek van 75° met de laserstraal getroffen. Hergroei trad trager op dan bij met een schaar doorgeknipte stengels.

In een oriënterende proef van Kurstjens & Vermeulen (2000) in gele mosterd met een stengeldikte van 1,2 mm (Fig. 3.12), was een energiedosis van 0,2 Joule per plant voldoende om 86% van de planten te doden. Deze energiedosis komt overeen met een passagesnelheid van 150 mm/s van een 25 W CO<sub>2</sub> laser, te laag voor praktische toepassing. Handzame CO<sub>2</sub>-lasers met een groter vermogen, die sneller kunnen snijden, komen zo langzamerhand



Figuur 3.12 Laboratoriumopstelling van een 25 W laser voor het doorsnijden van gele mosterdplanten voor het experiment van Kurstjens & Vermeulen (2000).

beschikbaar. Een nieuwe ontwikkeling is ook de pulserende laser, waarbij zeer hoge piekstralingsdichtheden gehaald kunnen worden (tot 100 MW/cm<sup>2</sup>). Welke snijnelheden met de nieuwste lasers gehaald kunnen worden voor het afsnijden van onkruid is een punt van nader onderzoek. Overigens is bij het beschikbaar komen van betaalbare infraroodlasers met een groter vermogen nog een lange technische weg te gaan om het onkruid te detecteren, de laserstraal te sturen en het gesneden materiaal af te voeren. De hoeveelheid fossiele energie die nodig is om laserstraling op te wekken is ruwweg een factor 30 hoger dan de hoeveelheid die als straling beschikbaar komt.

## Afsnijden met laserstraling: mogelijkheden en beperkingen

### **Technische mogelijkheden**

Een laserstraal is slechts over een klein gebied gefocuseerd en actief. Het is dus niet mogelijk een gebied van enkele tientallen centimeters of meters in één keer door een horizontale laserstraal 'af te scheren'. Het 'brandpunt' van de laserstraal zal zeer precies gericht moeten worden op de onderste stengeldelen en daar een zekere tijd op gericht moeten blijven. De behandeltijd is afhankelijk van energiedichtheid. In proeven met een voortschrijdende, horizontale laserstraal werden tot nu toe snelheden tussen de 1,5 en 150 mm/s gevonden. Tien keer hogere snijnelheden zijn echter mogelijk door gebruik van lasers met een hoog vermogen. De resolutie van de behandeling is groot gezien de diameter van de werkzame laserstraal (< 7 mm). Besturing van de laserstraal is daarom zeer noodzakelijk en moet zeer precies en snel zijn. Lasers zijn vaak gevoelig voor schokken en trillingen. Zorg voor een goede vering en schokdemping is daarom vereist.

### **Bestrijdingseffectiviteit**

Gerapporteerd werd dat de hergroei van planten die door laser afgesneden zijn trager is dan de hergroei van doorgeknipte planten.

### **Inzetmogelijkheden**

De toepassingsmogelijkheden zijn voorlopig nog zeer beperkt. Als hogere snijnelheden binnen bereik komen is toepassing, eventueel in combinatie met onkruidherkenning en sturing van de laserstraal, denkbaar in situaties met weinig en/of klein onkruid, zowel op vlak terrein als rond obstakels.

### **Productiviteit**

Doordat voorlopig nog maar zeer lage snijnelheden mogelijk zijn is de capaciteit zeer laag, zelfs als voor de besturing een oplossing gevonden is.

### **Milieu**

De gerapporteerde hoeveelheid energie voor het doorsnijden van een stengel van 1 tot 1,5 mm doorsnede varieert van 0,2 tot ca 7 Joule. Het opwekken van laserenergie kost – afhankelijk van het type laser – veel tot zeer veel energie. CO<sub>2</sub> lasers zijn een van de meest efficiënte uitvoeringsvormen. Desalniettemin moet gerekend worden met een flink energiegebruik, ruwweg een factor 30 maal de hoeveelheid die als straling beschikbaar komt.

### **Veiligheid/neveneffecten**

Het moet worden voorkomen dat de laserstraal door een spiegelen voorwerp buiten de afscherming kan treden, waardoor onveilige situaties kunnen ontstaan. Er zijn geen neveneffecten te verwachten.

### **Kosten**

Vooralsnog hoog; maar er is toekomstperspectief.

### 3.4 Verhitting van specifieke plantbestanddelen

#### 3.4.1 Algemeen

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. Volgens de quantum mechanica benadering kunnen specifieke moleculen door bepaalde discrete energieniveaus op een hoger rotatie- en trillingsenergieniveau worden gebracht. Daarom moet het met monochromatische straling of straling met een zeer beperkt golflengtegebied mogelijk zijn om slechts bepaalde moleculen "aan te slaan". 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 mogelijkheid om een hoge stralingsdichtheid (b.v. 1,4 MW/cm<sup>2</sup>) op een klein gebied (b.v. 0.3 mm diameter) te realiseren wordt bij lasers gewoonlijk vooral gedacht aan het snijden van diverse materialen (zie § 3.3.2). Er zijn echter voorbeelden dat bij lagere stralingsdichtheden het aanstralen van specifieke plantbestanddelen effectief kan zijn:

In experimenten van Bayramian *et al* (1992) met een 10 W CO<sub>2</sub> laser (straaldikte 6 mm) was een energiedichtheid van 2620 kJ/m<sup>2</sup> voldoende om het transportweefsel van wilde haver en rogge te blokkeren. Couch & Gangstad (1974a) bestraalden *Lemna minor* planten met een CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He laser met 10,6 μm golflengte en een stationaire bolle spiegel. Een bewegende vlakke spiegel gaf een gelijkmatiger stralingsintensiteit (Long & Smith, 1975). Bestraling met een energiedichtheid van 1.000 KJ/m<sup>2</sup> was dodelijk, terwijl bij 100 kJ/m<sup>2</sup> alleen de voortplanting werd verhinderd. De groei van waterhyacint (*Eichhornia crassipes*) werd reeds geremd bij 10 kJ/m<sup>2</sup>, terwijl 40 kJ/m<sup>2</sup> de fotosynthese in behandeld bladweefsel halveerde (Couch & Gangstad, 1974b).

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.

#### 3.4.2 UV-straling

UV-straling, met name UV-C (200–280 nm), wordt uitstekend geabsorbeerd, maar dringt niet door in (groene) plantendelen, waardoor het merendeel van de energie in de buitenste dunne laag (< 0,5 mm) wordt omgezet in warmte. Hierdoor wordt de buitenste laag van de plantendelen beschadigd en treedt verwelking op. Omdat alleen de buitenlaag van de plant wordt opgewarmd is er theoretisch minder energie nodig dan bij stootbranden. Een tweede gerapporteerd effect van UV-straling met de golflengte 254 nm is dat deze ingrijpt in het delingsproces van DNA van bacteriën en dus de groei daarvan stopt. Dit effect wordt toegepast bij de ontsmetting van water. In hoeverre dit voor DNA van onkruid van belang is, is niet bekend.

Electro Light ApS (Kaerparken 4, 2800 Lyngby, Denemarken) bericht over de toepassing van UV-straling in de onkruidbestrijding (<http://www.kaj.dk>). Een energiedosis vanaf 10 kJ/m<sup>2</sup> (uitgestraald als UV) was voldoende om plantaardige begroeiing binnen een week na toediening te laten verwelken. De 3 kW gasontladingslamp, die in de experimenten gebruikt werd, gaf 16% van de opgenomen energie af als UV-C straling, 7% als UV-B, 7% als UV-A,

14% als zichtbaar licht, 35% in het IR - gebied terwijl 21% verloren ging als warmteontwikkeling in de lamp en in de elektronica en de bedrading. Deze cijfers zijn karakteristiek voor UV-gasontladingslampen. De ca 30% uitgestraalde UV-energie wordt voor ca 90 % gebruikt om de buitenste laag van het plantaardige materiaal te verwarmen. Bij een blootstellingstijd van 1 à 3 seconden, afhankelijk van hun grootte, bleken de bovengrondse plantendelen na enkele dagen te verwelken.

Volgens Electro Light is de efficiëntie van energie-overdracht via UV-energie een factor 4 hoger dan met branders en/of IR-stralers. Proeven verricht door de Royal Veterinary and Agricultural University in Frederiksberg in Denemarken, met een straler met een intensiteit van  $0,25 \text{ W/cm}^2$  en een blootstellingsduur van 0-9 seconden op *Chrysanthemum segétum* en op *Viola arvensis* gaf goede resultaten ([http:// www.kaj.dk/weed-photo.htm](http://www.kaj.dk/weed-photo.htm)).

Recent werd onderzoek uitgevoerd met een prototype UV-straler op natuurlijk ontstane begroeiing op trottoir en op gazon (Vermeulen *et al*, 2002). De UV-straler werd toegepast met de lamp op 10 cm boven de verharding en het gazon. Hierbij werd het bestrijdingseffect van de UV-straler vergeleken met dat van een lichte, handgeduwde brander (vermogensdichtheid fossiel  $79 \text{ kW/m}^2$ ). Om de potentie goed weer te geven werden de resultaten omgerekend naar 95% bestrijdingseffect op gazon (fossiele dosis van ca  $365 \text{ kJ/m}^2$  bij stootbranden) en denkbeeldige werktuigen met een breedte van 1 m en een lengte van 1 m, met de maximaal technisch mogelijke vermogensdichtheid fossiel (UV:  $295 \text{ kW/m}^2$ ; Stootbranden:  $300 \text{ kW/m}^2$ ). De overdracht van UV-stralingsenergie op de planten was drie keer zo efficiënt als de overdracht van warmte bij de stootbrander. Dit effect werd echter geheel teniet gedaan door het kleine totale rendement (1,8% van diesel naar UV-straling) van de opwekking van UV-straling op een mobiel apparaat. De potentiële netto productiviteit bij UV-straling ( $990 \text{ m}^2/\text{uur}$  op gazon) was daarom 3 keer zo laag als bij de modernste stootbrander ( $2.960 \text{ m}^2/\text{uur}$  op gazon) en het brandstofverbruik ongeveer 3 keer zo hoog.



## UV-straling: mogelijkheden en beperkingen

### **Technische mogelijkheden**

Snel aan- en uitschakelen van de straler is niet mogelijk daar deze enkele minuten nodig heeft om op "oorlogssterkte" te geraken. Wel kan tijdelijk een klep voor een deel van de straler geschoven worden om bijvoorbeeld grasranden te beschermen. De mogelijkheden voor pleksgewijs werken liggen vooral in het variëren van de stralingsdosis d.m.v. variëren van de voortgangssnelheid of besturing van de straler. De resolutie is dan afhankelijk van de afmetingen van de straler.

### **Bestrijdingseffectiviteit**

Evenals bij stootbranden worden alleen de bovengrondse delen gedood. De verwachte bestrijdingseffectiviteit in termen van hergroei is daarom in eerste instantie vergelijkbaar met branden. Systemische effecten zijn geopperd, maar werden niet gerapporteerd.

### **Inzetmogelijkheden**

Inzet lijkt in ieder geval mogelijk op vlakke verhardingen. Brandgevaar, zoals aanwezig bij branders, lijkt hier nauwelijks aanwezig hetgeen toepassing in natuurgebieden, begraafplaatsen e.d. mogelijk maakt.

### **Productiviteit**

Volgens Electro Light ApS kan met een 100 pk (75 kW) landbouwtrekker voldoende energie kunnen worden opgewekt om per uur ca 1 ha volvelds te bewerken. Bij een hoog geïnstalleerd vermogen zou met hoge snelheden kunnen worden gewerkt, bijvoorbeeld op ballastbedden onder spoorrails. De begroeiing op een 4 meter brede strook zou dan gedood kunnen worden met een straler van 20 m lengte, 4 m breedte, en een geïnstalleerd vermogen van 2,8 MW (te betrekken van de bovenleiding) met een snelheid van 72 km/h. Recent eigen onderzoek (Vermeulen *et al*, 2002) wijst op een 3 x lagere potentiële productiviteit dan die van stootbranden.

### **Milieu**

Bij een UV-straler met maximale capaciteit, werkend op 5-10 cm boven het onkruid, was het fossiel energieverbruik, bij gelijkblijvend effect, ongeveer 3 keer hoger dan bij stootbranden.

### **Veiligheid/neveneffecten**

Omdat UV-licht lasogen veroorzaakt is volledige afscherming van de werkruimte noodzakelijk. Brandgevaar lijkt nauwelijks aanwezig tenzij een machine lang stil staat. De neveneffecten voor de behandelde omgeving bij aanstraling met UV-licht lijken nihil.

### **Kosten**

De kosten van bestrijding met UV-straling zijn nog onbekend. Op basis van recente ervaringen wordt geschat dat de kosten/m<sup>2</sup> ca 4 x hoger zullen zijn dan bij stootbranden.

## 3.5 Vergelijking toekomstig perspectief van verhittingsmethoden

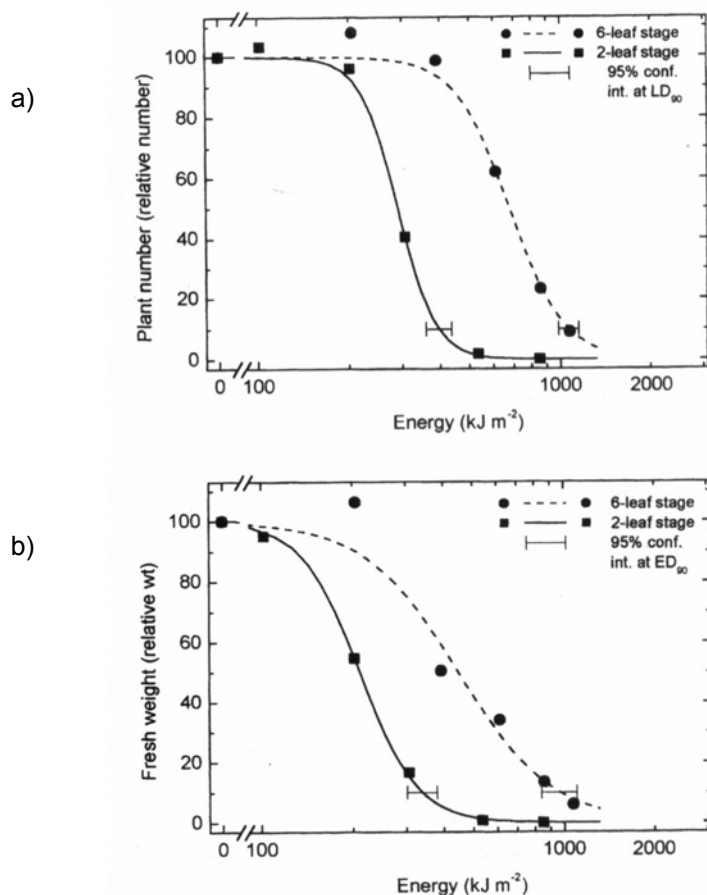
In dit hoofdstuk wordt samenvattend het perspectief van de verschillende genoemde verhittingstechnieken geanalyseerd tegen de achtergrond dat de bestrijdingseffectiviteit en de productiviteit hiervoor de belangrijkste criteria zijn.

### 3.5.1 Effectiviteit

De effectiviteit van verhitting op korte termijn is steeds een dosis-responscurve, zoals weergegeven in figuur 3.13 van Hansson & Ascard (2002) voor bestrijding van *Sinapsis Alba*

met heet water. Op de x-as staat de hoeveelheid toegevoerde energie per vierkante meter en op de y-as de schade die aan de planten is toegebracht. Kenmerkend is dat er bij lage energietoevoer eigenlijk niets gebeurt, daarna loopt de schade snel op en tenslotte moet er voor het doodmaken van de laatste 5% van de plant nog eens heel veel energie ingestopt worden. De mate van doding zal direct invloed hebben op de effectiviteit op wat langere termijn, d.w.z. de mate van hergroei. Dit effect op wat langere termijn wordt in de praktijk overigens vaak bedoeld als men spreekt over de effectiviteit.

Figuur 3.13 maakt ook één van de redenen duidelijk waarom de meningen over de effectiviteit, het energieverbruik in de praktijk nogal eens sterk verschillen: het is namelijk heel moeilijk om visueel te beoordelen of er nu 90, 95 of 99% van de plant beschadigd is. Voor een juiste vergelijking van de effectiviteit en het energieverbruik van verhittingstechnieken is het noodzakelijk om uit te gaan van óf eenzelfde effectiviteit óf eenzelfde dosis, en kan men niet om degelijke dosis-respons experimenten heen.



Figuur 3.13 Effect van heet water op het relatieve aantal *Sinapsis Alba* planten (boven) en het versgewicht van de planten (onder) 7 dagen na behandeling, in vergelijking met onbehandelde planten bij twee groeistadia (Hansson & Ascard, 2002).

Een tweede reden voor verschillen in effectiviteit die niet aan de verhittingstechniek toe te schrijven zijn is de soort, het stadium en de dichtheid van het onkruid waarmee de proeven uitgevoerd werden. Internationaal is het daarom gebruikelijk geworden om de dosis-respons

te meten in uitgezaaide gele mosterd in ongeveer het 4 blad stadium. Daarnaast wordt ook wel Engels raaigras gebruikt. Bij dit gewas liggen de groeipunten meer verborgen dan bij gele mosterd, waardoor wellicht een reëler beeld ten opzichte van de normale onkruidgroei op verhardingen ontstaat.

Een derde reden waardoor gerapporteerde effectiviteiten voor dezelfde verhittingstechniek sterk kunnen verschillen is de wijze waarop het bestrijdingseffect bepaald wordt (Kurstjens & Vermeulen, 2000). Gebruikte karakteristieken voor de effectiviteit zijn o.a.: 1) het relatieve versgewicht van behandeld onkruid t.o.v. onbehandeld, enige tijd na behandeling; 2) idem, het relatief aantal levende planten; 3) idem, de relatieve bedekkingsgraad; 4) visuele inschattingen.

Een vierde reden voor verschil in dosis-responscurven, tenslotte, is de soort energie die op de X-as bedoeld wordt. Dit kan variëren tot de hoeveelheid energie die daadwerkelijk de planten bereikt tot de hoeveelheid fossiele energie die netto of bruto (inclusief inefficiënties in de uitvoering van het werk) voor de behandeling nodig is. Omrekening van de ene soort energie in de andere is mogelijk als de rendementen bekend zijn. In figuur 3.14 is weergegeven welke rendementen onderscheiden kunnen worden.

### 3.5.2 Productiviteit

De relatie tussen de effectiviteit en de potentiële productiviteit (op open terrein) van een bepaalde verhittingstechniek wordt bepaald door de maximaal mogelijke machineafmetingen en de maximaal mogelijke hoeveelheid energie die, technisch gezien, per seconde (vermogensdichtheid kW/m<sup>2</sup>) opgewekt kan worden. Is de gewenste effectiviteit en de dosis-responscurve bekend, dan is af te leiden hoeveel energie per vierkante meter nodig is en volgt daaruit de mogelijke rijsnelheid (en dus de netto productiviteit) van een machine met maximaal mogelijke afmetingen. In formulevorm is het verband tussen netto productiviteit en bestrijdingseffectiviteit als volgt weer te geven:

$$P = V \times B = \frac{(E_s \times L \times B \times \eta_{c1} \times \eta_{c2} \times \eta_w)}{D_e} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

waarin (zie ook figuur 3.15):

$P$  = netto productiviteit in m<sup>2</sup>/s

$V$  = rijsnelheid in m/s

$B$  = werkbreedte in m

$E_s$  = vermogensdichtheid fossiel (=  $E / (L \times B)$ , met  $E$  = fossiel vermogen in kW) in kW/m<sup>2</sup>

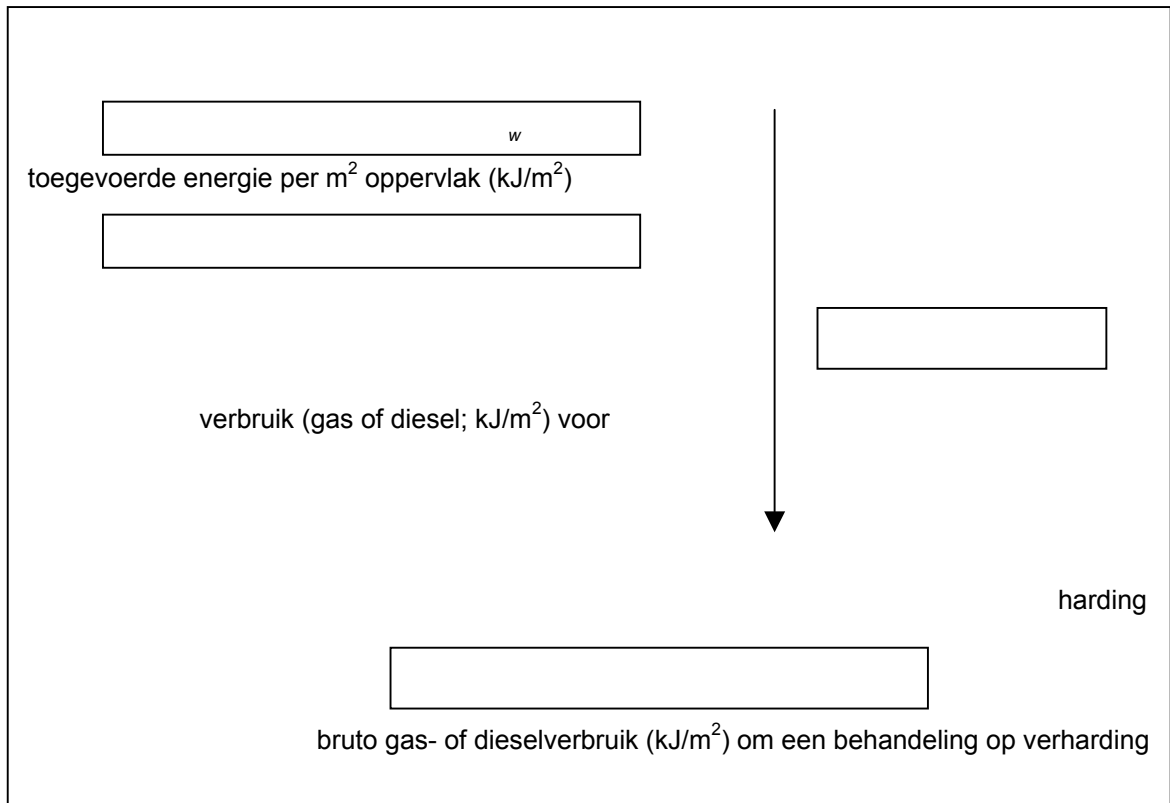
$L$  = werklengte in m

$\eta_{c1}$  = energieconversierendement 1

$\eta_{c2}$  = energieconversierendement 2

$\eta_w$  = warmteoverdrachtsrendement

$D_e$  = benodigde energie voor opwarming van de vegetatie aanwezig op 1 m<sup>2</sup> tot 70°C, op basis van de soortelijke warmte van de biomassa.



Figuur 3.14 Schematische weergave van enkele soorten energie die voor het maken van dosis-responscurven gebruikt kunnen worden en de omrekeningsfactoren hiertussen (rendementen).

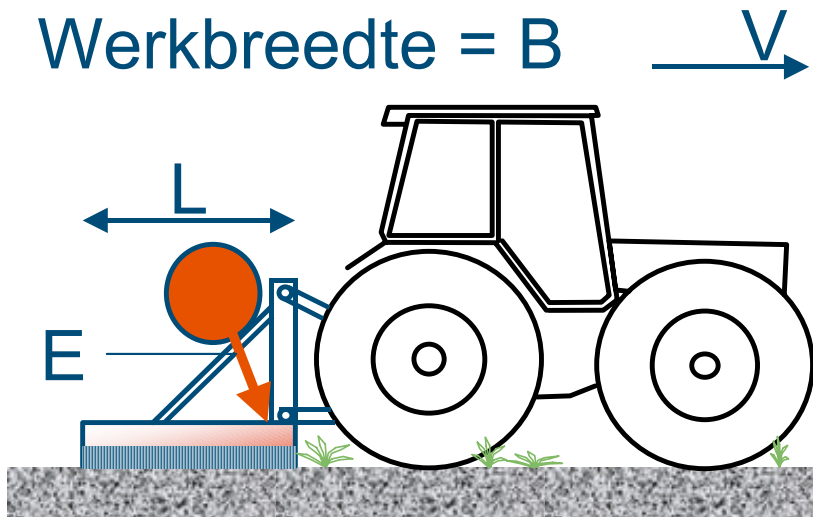
### 3.5.3 Rekenvoorbeeld

Als voorbeeld gaan we uit van een situatie met gele mosterd in het 2 bladstadium met een versgewicht van de biomassa van 171 gram per m<sup>2</sup>. Als doelstelling nemen we 95% doding van de gele mosterd op basis van versgewicht. Als techniek werd gekozen voor infrarode straling.

Berekend uit de soortelijke warmte is 36 kJ/m<sup>2</sup> geabsorbeerde straling nodig om de biomassa op te warmen tot 70°C ( $D_e$ ). Van de hoeveelheid straling die toegevoerd wordt mist echter een groot deel zijn doel of wordt door het blad teruggekaatst. Uit de dosis-respons curve (Kurstjens & Vermeulen, 2000) is op te maken dat in werkelijkheid 260 kJ straling per m<sup>2</sup> nodig is om 95% doding te krijgen. Het warmteoverdrachtsrendement ( $\eta_w$ ) is dan 14%.

Bij de opwekking van IR-straling met LPG, via verhitting van keramische platen, wordt in één conversiestap 44% van de energie-inhoud van LPG in straling omgezet. De rest gaat verloren als warmte, die je in dit geval niet meer goed kunt gebruiken om de planten te verhitten. Het energieconversierendement ( $\eta_c$ ) is dus 44%. Door de machine moet dus per vierkante meter 590 kJ brandstof verstoofd worden. Omgerekend naar gasverbruik is dit 11,8 g/m<sup>2</sup> dan wel 118 kg per ha.

Het totale rendement in dit overigens uiterst gunstige geval is dus 6%. Op verhardingen is meestal sprake van een kleinere bedekkingsgraad van het oppervlak en van een heel wat lastigere onkruidvegetatie. Het rendement zal daarom in de praktijk altijd kleiner zijn.



Figuur 3.15 Schematische weergave van de werktuiggegevens die voor de productiviteit van belang zijn.

Wat betreft het werktuig gaan we uit van een achter de trekker hangende kap waaronder de IR-straling opgewekt wordt. In lengte en breedte van de kap zijn we vanwege de nodige wendbaarheid van de machine beperkt, zeg tot 1 meter. Naarmate er per seconde meer straling onder de kap opgewekt wordt kan er sneller gereden worden. Hieraan is echter bij de verschillende technieken een technische bovengrens. Bij stootbranden bijvoorbeeld gaat het materiaal smelten als er per seconde te veel warmte toegevoerd wordt. Bij IR-straling is de hoeveelheid straling afhankelijk van de temperatuur van de straler. Deze is eveneens beperkt tot ca 1.000°C (zie paragraaf 3.1.2). Aangeduid als vermogensdichtheid fossiel ( $E_s$ ), in kJ per seconde en per  $m^2$ , is de technische bovengrens bij IR-straling bij de huidige stand van de techniek ca 250-300  $kW/m^2$ .

Volgens de formule uit paragraaf 3.5.2. is de maximaal haalbare netto productiviteit nu 0,51  $m^2/s$  en de maximale rijnsnelheid is 0,51 m/s. Nut van deze berekeningsmethode is dat op basis van parameters bepaalde technische innovaties zonder proeven op een eenduidige wijze geëvalueerd kunnen worden vóórdat een machine daadwerkelijk gemaakt wordt.

#### 3.5.4 Productiviteitsvergelijking op vlakke verharding

In de formule staan de zes factoren die de productiviteit  $P$  bepalen. Drie daarvan staan vast, onafhankelijk van de technische methode die toepast wordt. Dat zijn de maximale lengte ( $L$ ) en breedte ( $B$ ) van de kap en  $D_e$  (de energie nodig om 171 gram biomassa te verhitten tot 70 graden). De andere drie hangen wel samen met de verhittingstechniek die toegepast wordt. Dit zijn  $E_s$ ,  $\eta_c$  en  $\eta_w$ . Voor de voorbeeldsituatie in bovenstaande berekeningen zijn deze factoren ook voor de andere besproken thermische methoden zo goed mogelijk ingeschat en in tabel 3.1 weergegeven. Vervolgens is de potentiële netto productiviteit, relatief ten opzichte van stootbranden, berekend.

We zien in de tweede kolom dat de mogelijke vermogensdichtheid (fossiel) niet zoveel verschilt voor de verschillende technieken. Alleen bij magnetron zijn de veiligheidsaspecten

Tabel 3.1 Inschattingen, op basis van in voorgaande hoofdstukken beschreven informatie, van de potentiële netto productiviteit (relatief; stootbranden = 100) en de factoren die bij 95% bestrijdingseffectiviteit de productiviteit in gele mosterd (4-blad stadium) bepalen.

Methode	Maximale vermogensdichtheid fossiel $E_s$ (kW/m <sup>2</sup> )	$\eta_{c1}$ (%)	$\eta_{c2}$ (%)	$\eta_w$ (%)	$\eta$ (%)	Potentiële netto productiviteit $P$ (m <sup>2</sup> /s) (relatief)
Stootbranden	300	83		18	15	1,25 (100)
IR-straling (gas)	300	55		14	8	0,51 (41)
Heet water	350*	80*		6*	4*	0,33 (27)
Strijken	300*	70*		?	?	-
Magnetron	laag	30	30*	?	laag*	-
UV-straling	295	30	30	50*	4,5*	0,37 (30)

\* geschat.

waarschijnlijk zeer beperkend. Bij UV-straling zijn de afmetingen van de lampen, mede ten behoeven van de koeling, de beperkende factor.

Het brandstofconversierendement is logischerwijs het hoogste voor stootbranden omdat de energie in het gas direct omgezet wordt in warmte. Bij de overige technieken zitten er steeds één of twee extra conversiestappen tussen. Als voorbeeld: bij UV-straling maak je eerst elektriciteit van de diesel en daarna maak je straling van de elektriciteit, met als gevolg een conversierendement van slechts 9%. Het rendement van warmteoverdracht op de planten is redelijk hoog voor de stootbrander. Alleen bij UV-straling verloopt de overdracht van warmte naar de planten efficiënter. Het totale rendement is echter in alle gevallen lager dan bij stootbranden, wellicht met uitzondering van strijken waarover nog niets bekend is.

Samenvattend betekent dit dat met deze alternatieven voor stootbranden geen hogere productiviteit en/of lager energieverbruik verwacht mag worden, althans bij volveldsbehandeling. Bij pleksgewijs behandelen van de onkruidplekken, waardoor het warmteoverdrachtsrendement flink kan toenemen, kunnen de verhoudingen eventueel anders liggen.

Om de netto productiviteit om te rekenen naar de werkelijke productiviteit in de praktijk moet overigens nog vermenigvuldigd worden met de werkefficiëntie.

### 3.5.5 Productiviteitsvergelijking rondom obstakels

De arbeidsproductiviteit van onkruidbestrijding rondom obstakels, zoals verkeerselementen, kunstwerken en monumenten, is in de praktijk vele malen lager dan voor vlakke verharding. De redenen daarvoor zijn onder meer dat vaak voorzichtig te werk gegaan moet worden wegens mogelijke schroeischaade aan de objecten, dat veel onkruidplekken niet machinaal

bereikt kunnen worden en dat de objecten op afstand van elkaar liggen (geen continue werk mogelijk). Daarom wordt dit werk vaak handmatig uitgevoerd, met een lage werkefficiëntie.

Stootbranden met een handbrander heeft inderdaad als belangrijkste bezwaar dat objecten eventueel kunnen schroeien (hout, plastic). Ook dringt hete lucht moeilijk door in hoeken en gaten, waardoor het onkruid daar slecht bestreden wordt. Heet water, eventueel met schuimtoevoeging, is een relatief effectieve en snelle, maar ook kostbare methode zonder de genoemde bezwaren van de handbrander. Verbetering van de productiviteit kan wellicht ook bereikt worden door preciezer te werken met kleinere branders of stralers (bijv. gefocusseerd IR of UV of IR-laser), geholpen door besturingssystemen (variërend van eenvoudige zichtsysteem tot targetmap- of sensorgestuurde systemen).





## 4 Mogelijke methodieken voor plaatsspecifiek werken

Door de bestrijdingsbehandeling af te stemmen op de hoeveelheid en/of soort onkruid die aanwezig is op specifieke plekken op de verharding (plaatsspecifiek werken), is in principe verbetering van de effectiviteit en/of besparingen op benodigde energie en tijd mogelijk.

Naarmate de behandeling nauwkeuriger afgestemd wordt op de onkruidsituatie neemt de meerwaarde, in termen van verbetering van de bestrijdingseffectiviteit en besparingen op energie en tijd, relatief gezien af en de kosten toe. In dit rapport beperken wij ons tot een aantal relatief eenvoudige varianten:

- De "alleen daar waar onkruid kan staan" variant (hier van belang als men alleen de voegen van elementverhardingen wil behandelen), in dit rapport aangeduid met gericht werken;
- De "aan-uit bij wel-geen onkruid" variant van plaatsspecifiek werken, in het algemeen aangeduid met pleksgewijs werken;
- De "hogere dosis naarmate er meer onkruid staat" variant, hier aangeduid als dichtheidspecifiek werken.

Hoewel er in principe mogelijkheden zijn om ook onkruidsoorten te herkennen, zijn deze methoden complex en nog weinig ontwikkeld. Ook is er nog te weinig kennis over afstemming van niet-chemische onkruidbestrijding op de soort onkruid. Om deze redenen wordt hier niet verder ingegaan op soortspecifiek werken.

In alle gevallen moet in de eerste plaats duidelijk worden welke plekken behandeld moeten worden (voegdetectie en onkruidplekdetectie) en, in geval van dichtheidspecifiek werken, welke bestrijdingsdosis op een bepaalde plek gegeven dient te worden (dichtheidsdetectie). Van belang voor de mogelijkheden van een bepaalde methodiek is ook dat duidelijk is hoe precies men ruimtelijk gezien kan en wil werken, zowel bij de detectie als bij de bestrijding (ruimtelijke resolutie).

Hieronder worden een aantal mogelijkheden voor detectie en sturing van de machine genoemd voor gericht, pleksgewijs en plaatsspecifiek werken. Voor meer details over de mogelijkheden voor onkruiddetectie wordt verwezen naar Vermeulen & Hemming (2000).

### *Detectie van voegen van elementverhardingen en gericht werken*

Als men kleine branders, stralers of borstels boven of door de voegen van elementverharding wil leiden is een hoge ruimtelijke resolutie van detectie en werktuigsturing noodzakelijk om met een nauwkeurigheid van zeg  $\pm 5$  mm de voegen te volgen. Commerciële systemen zijn hiervoor niet beschikbaar. Ideeën voor mogelijke methodieken zijn:

- Visuele waarneming en handbesturing van handwerktuigen door de voeg. In zekere zin wordt deze methode al in de praktijk toegepast bij de bosmaaier met nylon draad of borstel. Verbetering van deze methode lijkt mogelijk door één of meerdere snijkoppen, branders of stralers (op tegelafstand) verticaal te plaatsen onder een met steunwielen uitgeruste kap (als bescherming tegen o.a. rondvliegende steentjes), waarbij de precieze locatie van de werkende onderdelen kan worden gecontroleerd met een vizier of een aanduiding op de kap;

- Real-time herkenning van de voegen door verwerking van de beelden van een web-cam of videocamera voorop de machine. Eventueel is hierbij herkenning van het patroon van de elementverharding noodzakelijk, analoog aan het inmiddels in de landbouw beproefde Ecodan<sup>®</sup> systeem voor herkenning van gewasrijen. Na detectie van de voegen moeten de relatief kleine borstels, branders of stralers dan over de voegen heen gestuurd worden. Een idee hiervoor is toepassing van een type SCARA robotarm, die met name bekend staat om de mogelijkheid van zeer snelle bewegingen in het horizontale vlak;
- Bepaling van de plaats van de voegen door een éénmaal onder gunstige omstandigheden gemaakte digitale kaart van de voegen in de verharding, gecombineerd met bepaling van de plaats waar men zich bevindt door een nauwkeurig RTK-DGPS systeem. Gebruik van referentie punten op de verharding is hierbij denkbaar. De besturing van de werkende elementen zou kunnen gebeuren zoals genoemd onder real-time herkenning.

#### *Detectie van onkruidplekken en pleksgewijs werken*

We definiëren een onkruidplek als een gebied waarin de onkruidichtheid een bepaalde grenswaarde overschrijdt. De benodigde detectieresolutie hangt af van de minimale grootte van het oppervlak dat tegelijkertijd behandeld wordt door de machine of één van meerdere actuatoren in de machine. Ter verduidelijking: bij een stootbrander met een branderkap van 50 x 50 cm is het voldoende om steeds te kijken of plekken verharding met een afmeting van 50 x 50 cm behandeld moeten worden of niet. Bij een handbrander, met kleinere afmetingen, of bij een stootbrander met meerdere, afzonderlijk aanstuurbare branders is de benodigde detectieresolutie hoger (bijv. 10 x 10 cm). Commerciële bestrijdingssystemen voor pleksgewijs werken zijn voor chemische bestrijding beschikbaar, maar niet voor niet-chemische toepassingen in gebruik. Ideeën voor mogelijke methodieken zijn:

- Visuele waarneming gecombineerd met het in en uit werking zetten van de machine of de werkende delen daarvan als er wel of geen onkruid staat. Deze methode wordt volop in de praktijk toegepast, bijvoorbeeld bij bosmaaiers, handbranders en handbediende stoomapparatuur, maar ook bij grotere onkruidborstelmachines en -branders. Een variant hierop is dat de werkende delen niet uitgezet worden als er geen onkruid staat, maar dat onkruidvrije zones sneller gepasseerd worden.
- Real-time herkenning van onkruid; rastervlakmethode. Bij systemen voor selectief spuiten worden in de praktijk stralingsreflectie- of chlorofylfluorescentiesensoren gebruikt. De basis voor onderscheid tussen onkruid en verharding is hierbij de aanwezigheid van (actief) chlorofyl, dat wat betreft stralingsreflectie en fluorescentie onder alle omstandigheden een ander gedrag vertoont dan dode materialen (verharding). Stralingsreflectiesensoren worden o.a. toegepast in detectiesystemen van Detectspray<sup>®</sup>, WeedSeeker<sup>®</sup> en Spray Vision<sup>®</sup>, en fluorescentiesensoren in het detectiesysteem van Weed-It<sup>®</sup>. De kleinste mogelijke resolutie wordt bepaald door de grootte van het waarnemingsoppervlak van de sensor. Het te behandelen oppervlak wordt in rastervlakken opgedeeld ter grootte van dit waarnemingsoppervlak. Bij bovengenoemde systemen is de grootte van het rastervlak enkele tientallen cm<sup>2</sup>. Voorts wordt dan per rastervlak besloten of er wel of niet bestreden wordt (rastervlakmethode). Voor de technische uitvoering van het al of niet behandelen van de rastervlakken zijn meerdere opties voorhanden, zoals 1) het aan- en uitschakelen van de gehele machine, 2) het aan- en uitschakelen van één of meer van de werkende elementen (actuatoren) en 3) het

sturen van één actuator naar de te behandelen rastervlakken. Per bestrijdingsprincipe zal nader bestudeerd moeten worden wat de beste wijze van uitvoering zal zijn uit overweging van productiviteit en kosten.

- Real-time herkenning van onkruid; clustermethode. In principe is het ook mogelijk om met sensoren een beeld van een relatief groot te behandelen oppervlak op te slaan en vervolgens het beeld softwarematig met clusteringtechnieken te verwerken en daarin onkruidplekken te herkennen (clustermethode). Op deze wijze kan de resolutie en daarmee de besparing op energie en tijd verhoogd worden. De apparatuur voor uitvoering van de bestrijding moet hier dan uiteraard ook voor geschikt zijn, bijvoorbeeld door toepassing van X-Y tafel- of robotarmtechnieken. Voor toepassing van de clustermethode zijn mogelijkheden (Felton & Nash, 1998), maar deze zijn veel complexer dan bij de rastervlakmethode en lijken maar beperkt meerwaarde te hebben. Ze worden niet commercieel toegepast.
- Real-time herkenning van onkruid door verwerking van de beelden van een web-cam of videocamera voorop de machine. De basis voor onderscheid tussen onkruid en verharding is in dit geval de grijswaarde of, eventueel, de kleur. Hoewel technisch relatief eenvoudig is de vergelijking van de gemiddelde grijswaarde van het gehele beeld met een grenswaarde in de praktijk lastig omdat de grijskenmerken van onkruid en verharding, inclusief de grenswaarde, voor iedere situatie weer verschillend zijn en ook afhangen van de belichting. Toepassing ligt daarom niet direct voor de hand.

Toepassing van remote sensing voor onkruidbestrijding op verhardingen ligt niet voor de hand omdat de ruimtelijke resolutie daarbij onvoldoende is. Overige (historische) kaartgebaseerde methoden op basis van visuele- of sensordetectie op kleine afstand lijken ook onaantrekkelijk vanwege de benodigde tijd voor scouting en het feit dat het onkruidbeeld op verharding in de tijd niet stabiel is.

#### *Detectie van hoeveelheid onkruid en dichtheidspecifiek werken*

Als we de bestrijdingsdosis, in de vorm van bijvoorbeeld de hoeveelheid toegediende straling of de borsteltijd en -agressiviteit, willen afstemmen op de hoeveelheid onkruid kunnen grotendeels dezelfde methodieken gevolgd worden als voor pleksgewijs werken. De wijze van aansturing van het werktuig of de actuatoren verandert hierbij echter van aan/uit naar variabele-dosis. Commerciële bestrijdingssystemen voor dichtheidspecifiek werken met niet-chemische technieken zijn niet beschikbaar. Ideeën voor mogelijke methodieken zijn:

- Visuele waarneming gecombineerd met een methode om de dosis te variëren. Deze methode wordt volop in de praktijk toegepast, waarbij bovendien tijdens het werk ook visueel waargenomen wordt of het resultaat afdoende is. Een voorbeeld hiervan is dat bij het werken met bosmaaiers, handbranders en handbediende stoomapparatuur langer stilgestaan wordt bij plekken met veel onkruid, totdat men 'tevreden' is met het resultaat. Andere voorbeelden zijn dat met branders wat langzamer gereden wordt als er veel onkruid staat en dat met borstelmachines herhaald bewerkt wordt, eventueel met een agressievere instelling, als er na de eerste keer borstelen nog onkruid staat.
- Real-time herkenning van de onkruidichtheid door sensoren, gebaseerd op stralingsreflectie of chlorofylfluorescentie. De basis voor bepaling van de onkruidichtheid is hierbij respectievelijk weer het verschil in reflectie tussen dood en levend materiaal en de fluorescentie van chlorofyl. Het verschil met pleksgewijs werken is dat nu niet met een grenswaarde voor de onkruidichtheid gewerkt wordt, maar dat de dichtheid continu

gedetecteerd wordt. De wijze van aansturing van het werktuig of de actuatoren verandert hierbij van aan/uit naar variabele-dosis. Voor de technische uitvoering van het behandelen van de rastervlakken met variabele dosis zijn meerdere opties voorhanden, zoals 1) het variëren van de dosis van de gehele machine (bijvoorbeeld de rijnsnelheid), 2) het variëren van het vermogen van één of meer van de actuatoren (bijvoorbeeld toepassing van een modulerende vlam) en 3) het variëren van de verblijftijd of het vermogen van één actuator die naar de te behandelen rastervlakken wordt gestuurd. Per bestrijdingsprincipe zal nader bestudeerd moeten worden wat de beste wijze van uitvoering zal zijn uit overweging van productiviteit en kosten.

Evenals bij pleksgewijs werken liggen toepassing van real-time video en van remote sensing voor detectie van de hoeveelheid onkruid en dichtheidspecifiek werken minder voor de hand.

## 5 Conclusies en aanbevelingen

Uit de verkenning kwam naar voren dat een complex van factoren de geschiktheid van een mogelijke techniek voor onkruidbestrijding op verhardingen bepalen. Het betreft met name de criteria bestrijdingseffectiviteit, arbeidsproductiviteit, bereikbaarheid van het onkruid, organisatiebehoefte van het werk, veiligheid en energieverbruik. Beheerders van verhardingen leggen prioriteit bij een hoge bestrijdingseffectiviteit en vooral een hoge arbeidsproductiviteit bij de uitvoering van een bestrijdingsronde, mits e.e.a. gebeurt met acceptabele veiligheid, kosten en energieverbruik.

Een samenvattend overzicht van wat van de onderzochte niet-chemische technieken verwacht mag worden, per criterium, is weergegeven in Bijlage 1. Op basis van de in dit rapport genoemde sterke en zwakke punten van de diverse technieken worden hieronder conclusies en aanbevelingen gedaan ten aanzien van perspectievolle richtingen voor verdere R&D op het gebied van niet-chemische onkruidbestrijdingstechnieken voor verhardingen.

In principe zijn alle onderzochte technieken onder te verdelen naar mechanische en thermische methoden met respectievelijk borstelen en stootbranden als referentietechnieken.

Uitgaande van een vlakke verharding en een vergelijkbaar onkruidododingspercentage is met mechanische methoden een hoge arbeidsproductiviteit gekoppeld aan een laag energieverbruik mogelijk, in vergelijking met thermische methoden. Waar mogelijk zijn daarom op vlakke verharding mechanische methoden te verkiezen boven thermische. Ten opzichte van de onkruidborstel bieden de volgende ideeën perspectief voor verbetering van de effectiviteit en de productiviteit met minder schade aan de verharding: 1) middelfrequent agressief berijden; 2) met kleinere borstels gericht op de voegen werken en dieper uitborstelen (op het zicht of met behulp van een voegherkenningssysteem), eventueel gecombineerd met pleksgewijs werken en 3) waterstraalsnijden.

Op kwetsbare verhardingen en halfverhardingen zijn mechanische methoden vaak niet mogelijk. Het ligt daarom voor de hand om vooral in deze situaties thermische methoden toe te passen. Een uitzondering geldt hier voor grind of een andere zeefbare verharding, waarvoor de ontwikkeling van een machine voor het opnemen, uitzeven en terugleggen wellicht een effectieve, goedkope oplossing kan bieden. Bij de verkenning van het potentieel van diverse thermische methoden op vlakke verharding bleek dat, bij gelijkblijvend bestrijdingseffect, met stootbranden potentieel de hoogste netto productiviteit gehaald zal kunnen worden. De overige technieken scoren allen lager, met name door lagere brandstofconversierendementen. Opvallend was dat er bij veel technieken een technische grens (door oververhitting, veiligheid of een andere oorzaak) bestaat, waardoor het geïnstalleerd fossiel vermogen maximaal ca 300 kW/m<sup>2</sup> kan zijn. Mogelijk bieden elektrocutie en “strijken” (pletten en/of aanstrijken met een heet voorwerp) mogelijkheden voor verbetering ten opzichte van stootbranden; de beschikbare informatie was onvoldoende om een vergelijk te kunnen maken. Evenals bij mechanische methoden is er uitzicht op verbetering van de productiviteit door gericht en pleksgewijs te verhitten. Met name voor de openvlam en voor gebundelde IR- en UV-straling worden mogelijkheden gezien.

Voor de bestrijding van onkruid in goten, rondom obstakels en bij kunstwerken en monumenten wordt de (zeer lage) productiviteit vooral bepaald door de lage werkefficiëntie en niet in de eerste plaats door de relatief lage onkruidododingsnelheid, zoals op vlakke

verharding. Redenen daarvoor zijn onder meer dat vaak voorzichtig (precies) te werk gegaan moet worden om schade te voorkomen, veel onkruidplekken niet met machines bereikt kunnen worden en de te behandelen plekken vaak op afstand van elkaar liggen (geen continu-werk mogelijk). Als gevolg hiervan dient bij nieuwe technieken nagegaan te worden of er mogelijkheden zijn om schade te voorkomen, onkruid ook op moeilijke plekken te bereiken en of uitvoering in één werkgang met de behandeling van het vlakke verhardingsdeel mogelijk is. Hierbij kwamen twee denkrichtingen naar voren. De eerste richting is dat de techniek geen schade aanbrengt aan obstakels etc. maar wel aan het onkruid; men hoeft dan minder precies te werken. Vooral waterstraalsnijden (handunit met roterende nozzle, middelhoge druk) en heet water (evt. met schuimtoevoeging) bieden hiervoor perspectief. De andere denkrichting is dat de machine zodanig uitgerust wordt dat snel en precies (zonder schade) werken mogelijk wordt. Opvoeren van de snelheid en de precisie is mogelijk door gebruikmaking van technieken met een hoge resolutie (bijv. kleine borstels, kleine vlam, gefocusseerde IR-straling, laser) gecombineerd met besturingsassistentie (variërend van eenvoudige zichtsysteem tot geavanceerde targetmap- of sensorgestuurde robotarmen). De laatste optie kan eventueel in één machine gecombineerd worden met het al voorgestelde richten van borstels op de voegen op vlakke verharding.

Op grond van de uitgevoerde verkenning bieden een groot aantal ideeën perspectief voor verbetering van de productiviteit en, in een enkel geval, de bestrijdingseffectiviteit. In samenwerking met machinefabrikanten, hoveniers en beheerders van verhardingen zal verder gekeken moeten worden naar het marktperspectief en de verdere ontwikkeling van deze ideeën.

Op het gebied van de bestrijdingseffectiviteit (dosis-respons curven en onkruidbeschadiging-hergroei relaties) van de diverse technieken onder uiteenlopende omstandigheden is nog onvoldoende bekend, met name wat betreft de effectiviteit op langere termijn bij specifieke beheersstrategieën. Deze kennis is belangrijk om richting te geven aan de ontwikkeling van effectieve technieken met een hoge productiviteit. Er wordt dan ook aanbevolen om hierover via onderzoek meer informatie te verkrijgen.

## 6 Referenties

- Alper, Bob (Ed.), 1970. Microwaves Make Things Hot, Svetlana Technical Bulletin No.59. Excerpt from article in Machine Design, October 1970. <http://www.svetlana.com>
- Anderson, R.L., C.M. Hansen, C. Thomas & J. Hull, 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, p 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, p 35-50.
- Ascard, J., 1995. Thermal weed control by flaming: Biological and technical aspects. Dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, department of Agricultural Engineering, Alnarp, report 200.
- Ascard, J., 1998. Comparison of flaming and infrared radiation techniques for thermal weed control. *Weed Research* 38:1, 69-76.
- Badger, George, 1970. Microwave Heating, excerpt from article in Machine Design, October 1970. <http://www.svetlana.com>
- Bayramian, A., P.K. Fay, W.E. Dyer & R.G. Lym, 1992. Weed control using carbon dioxide lasers. Proceedings of the Western Society of Weed Science, Salt Lake City, Utah, USA 10-12 March 1992, 45, p. 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. & J. Biggins, 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. & P. Ghesquiére, 1984. Flame weeding trials on seeded onions. In: Proceedings of the international meeting on flame weeding for weed control. 20-22 nov. 1984, Namer, Belgium. p. 26-33.
- Couch, R.W. & E.O. Gangstad, 1974a. The response of duckweed to laser radiation. *Hyacinth Control Journal* 12: 5, p. 25-26.
- Couch, R.W. & E.O. Gangstad, 1974b. Response of waterhyacinth to laser radiation. *Weed Science* 22: 5, p. 450-453.
- Daniell, J.W., W.E. Chapell & H.B. Couch, 1969. Effect of sublethal and lethal temperature on plant cells. *Plant Physiology* 44, p. 1684-1689.
- Diprose, M.F. & F.A. Benson, 1984. Electrical methods of killing plants. *Journal of Agricultural Engineering Research* 30, p. 197-209.
- Diprose, M.F., P.C. Longden, R. Fletcher & M.J. Champion, 1985. The use of electricity to control bolters in sugar beet (*Beta vulgaris* L.): A comparison of the electrothermal with chemical and mechanical cutting methods. *Weed Research* 25: 1, p. 53-60.
- Duffy, G.G., M.M. Walmsley & T.M. Smith, 1983. The drying of paper webs using a new infrared generator. *Appita* 37 no. 2.
- Ellwanger, T.C. Jr., S.W. Bingham & W.E. Chapell, 1973a. Physiological effects of ultra-high temperatures on corn. *Weed science* 21, 296-299.

- Ellwanger, T.C. Jr., S.W. Bingham, W.E. Chapell & S.A. Tolin, 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.
- Felton, W.L. & P.G. Nash, 1998. Role of reflectance techniques in precision weed management. In: Medd, R.W. and J.E. Pratley (eds), 1998. Precision weed management in crops and pastures; Proceedings of a workshop held on 5-6 May 1998 at Charles Sturt University, Wagga Wagga, NSW, Australia, p. 62-70.
- Fergedal, S., 1994. Weed control by freezing with liquid nitrogen and carbon dioxide snow – A comparison between flaming and freezing. In: Maitrise des avancées par voie non chimique. Communications de la quatrième conférence internationale IFOAM, Dijon, France, 5-9 July 1993.
- Fogelberg, F., 2000. Electroporation – Can we control weed seeds by the use of electric pulses applied in soil? 4<sup>th</sup> EWRS Workshop on Physical Weed Control. Elspeet, The Netherlands, 20-22 March 2000, p. 50.
- Geffen, J. van, 2001. Het groene boek; Tijdnormen aanleg & onderhoud van natuur, groen en recreatieve voorzieningen ingedeeld volgens RAW-systematiek. IMAG, Wageningen, IMAG-rapport 2001-05, 363 pp.
- 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.
- Groeneveld, R.M.W., 2000. Praktijkwaarnemingen naar de effectiviteit van heet water op onkruiden in de gemeente Ede. Interne notitie Plant Research International.
- Hansen, C.M., B. Snobar & R.W. Chase, 1970. Potato vine desiccation. Proceedings seventh annual symposium on thermal agriculture, sponsored by National LP-Gas Association and Natural Gas Processors Association, Dallas, Texas. p. 10-13.
- Hansson, D. & J. Ascard, 2002. Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control. *Weed Research* 42, 307-316.
- Hashish, M., 1985. *Application of abrasive water jets to metal cutting*. In: Proceedings Conference Non Traditional Machining, Ohio, II, USA, December 1985.
- Hege, H., 1989. Thermische Unkrautbekämpfung im Gartenbau. Institut für Technik im Gartenbau, Weihenstephan, Germany. 33 pp. (Unpublished report).
- Heisel, T., J. Schou, S. Christensen & C. Andreasen, 2001. Cutting weeds with a CO<sub>2</sub> laser. *Weed Research* 41: 19-29.
- Hekman, J., 2000. Onkruidbestrijding op verhardingen. Effectiviteitsonderzoek, Gemeente Veenendaal. Rapport Eco Consult.
- Hoffmann, M., 1989. Abflammtchnik. KTBL-Schrift 331, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- Hoksbergen, F., 2000. Waarnemingen naar de productiviteit en energieverbruik van diverse onkruidbeheermethoden, uitgevoerd in de gemeenten Ede en Breda. Interne notitie Alterra.
- Horton, P., A.V. Ruban & R.G. Walters, 1996. Regulation of light harvesting in green plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 47: 655-684.
- IKC, 2000. Evaluatie Meerjarenplan Gewasbescherming Openbaar Groen over 1998. IKC-Natuurbeheer Wageningen 74 pp.



- Johansson, M., 1991. Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare. Department of Control and Maintenance, Malmö.
- Kasper, G.J. & A.H. Bosma, 1995. Determination of the degree of conditioning of cut grass. In: 7<sup>th</sup> International Symposium Forage Conservation, 18-20 september 1995, Nitra, Slovak Republic, p. 113-117.
- Kaufmann, K.R. & L.W. Schaffner, 1982. Energy and economics of electrical weed control. *Transactions of the ASAE* 25: 2, p. 297-300.
- Klooster, J.J., 1983. Thermische onkruidbestrijding, een interessant alternatief. *Landbouwmecanisatie* 34: 8, 787-789.
- Kortenhoff, A., A. Uffing, D.A.G. Kurstjens, R.P. van Zuydam, J. Spijker & C.M. Niemeijer, 2000. Bestrijding kruidengroei op ZOAB, PRI rapport november 2000.
- Kortenhoff, A., 2001. Knelpuntanalyse met betrekking tot het terugdringen van gebruik en emissie van chemische bestrijdingsmiddelen door gemeenten op (half)verhardingen. Plant Research International, Nota 71, 45 pp (incl. bijlagen).
- Kortenhoff, A., R.M.W. Groeneveld, J.H. Spijker, C.M. Niemeijer & G.D. Vermeulen, 2001b. Heetwatertechniek. Een perspectiefvolle methode voor onkruidbeheer op (half)verhardingen?. Inventarisatie van de huidige kennis en ervaringen. Wageningen, Plant Research International, nota 86, 22 pp.
- 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. Wageningen, IMAG-DLO rapport 98-03, april 1998, 103 pp.
- Kurstjens, D.A.G., 1999. Onkruidbestrijding met infrarode straling op verhardingen – Deel 1 Verkenning. Wageningen, IMAG-DLO, interne nota P 99-28, maart 1999, 45 pp.
- Kurstjens, D.A.G., L.A.P. Lotz & G.D. Vermeulen, 1999. Hogedruk waterstralen voor onkruidbestrijding op verhardingen: eerste ervaringen. Intern rapport IMAG-DLO.
- Kurstjens, D.A.G. & G.D. Vermeulen, 2000. Onkruidbestrijding met infrarode straling op verhardingen. Deel 2: Stralingsdosis - effect relatie bij gele mosterd (*Sinapis alba* L.). IMAG Nota P 2000-56.
- Long, K.S. & P.A. Smith, 1975. Effects of CO<sub>2</sub> 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., S. Humphries & P.G. Falkowski, 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.
- Netland, J., G. Ballvoll & R. Holmøy, 1994. Band spraying, selective flame weeding and hoeing in late winter cabbage, Part II. *Acta Horticulturae* 372, p. 235-243.
- Nyström, P. & S.E. Svensson, 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., D.G. Batchelder, L. Bashford & G. McLaughlin, 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. p. 32-34.
- Posselius, J.H. Jr. & G.T. Conklin, 1986. Crowning carrots with a high pressure water jet. ASAE-paper 86-6550, 12 pp.
- Powell, J., 1998. CO<sub>2</sub> laser cutting. 2nd edn. Springer Verlag, Berlin.
- Rahkonen, J. & P. Vanhala, 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. & S.N. Singh, 1992. Enhanced infrared burner system. International Gas Research Conference.
- Salmela, J. & K.T. Ojala, 1994. Improving the efficiency of infrared drying with side emitters. CADDET Energy Efficiency Newsletter No. 3/1994.
- Schild, M. & B.L. Harriott, 1973. Cutting lettuce stems with a water jet. *Transactions of the ASAE* 16: p. 440-442.
- Senström, S., 1993. Modelling energy efficiencies and gas radiation in gasheated IR-dryers. LUTKDH / (TKKA-7016) / 1-40 / (1993).
- Speyer, R.F., W.Y. Lin & G. Agarwal, 1996. Radiant efficiencies and performance considerations of commercially manufactured gas radiant burners. *Experimental Heat Transfer* 9, 213-245.
- Srivastava, A. & R.J. Strasser, 1997. Constructive and destructive actions of light on the photosynthetic apparatus. *Journal of Scientific and Industrial Research* 56: 3, 133-148.
- Sutcliffe, J., 1977. Plants and temperature. The Institute of Biology's Studies in Biology no. 86, Edward Arnold, London. 57 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. p. 28-33.
- Valco, T.D., C.G. Coble & J.H. Ruff, 1989. Water jet cutting of sugarcane. *Transactions of the ASAE* 32: 2, 373-378.
- Vermeulen, G.D. & J. Hemming, 2000. Sensoren voor onkruiddetectie; een verkenning. Wageningen, IMAG-DLO, interne nota P 2000-33, april 2000, 18 pp.
- Vermeulen, G.D., R.P. van Zuydam & J. Kornet, 2003. Potentieel van onkruidbestrijding op verharding met UV-straling. In press.
- 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, p. 1-17.
- Vigneault, C., D.B. Benoit & N.B. McLaughlin, 1990. Energy aspects of weed electrocution. *Reviews of Weed Science* 5, p. 15-26.
- Warner, M.G.R., 1975. High speed thinning of rowcrops using water jet hoeing. NIAE, Silsoe, Note no. 60-1608, 10 pp.

Wolfe, W.L. & G.J. Zissis, 1985. The infrared handbook. Revised edition. Environmental Research Institute of Michigan.

## Bijlage 1 Samenvatting van criteriumgewijze beoordeling

Techniek	Effect <sup>1</sup>	Productiviteit bruto (m <sup>2</sup> /uur)	Energieverbruik bruto, fossiel (kJ/m <sup>2</sup> )	Inzetmogelijk- heden <sup>2</sup>	Veiligheid & neveneffecten <sup>3</sup>	Potentiële mogelijkheden voor toepassing/verbetering	Pleks- gewijs mogelijk?	Kosten- indicatie <sup>4</sup> €/m <sup>2</sup>
Chemisch, selectief	xx	2.300-4.600	< 50	xx/a,ev,hv/yyy	xx / y	nog preciezer werken	standaard	0,01-0,03
Mechanisch beschadigen								
Betreden/berijden	x onb.	mogelijk hoog	mogelijk laag	xx / a,ev,hv / y	x	grote open terreinen	strips	0,002
Vegen	x onb.	onbekend	onbekend	xx / ev / yyy	x	alleen als neveneffect	n.v.t.	0,05
Mechanisch verwijderen								
Borstelen + vegen	x	430-1.500	120 - 420	xx / ev / y	xx/ slijtage	richten op voegen	beperkt	0,08-0,16
Bosmaaier/draad, borstel	x	270-1.000	30 - 110	xx / ev / yy	xx/ slijtage	rond obstakels	standaard	0,03-0,10
Waterstraalsnijden	x	ca 750	hoog	xx / a, ev / yyy	xx/ h <sub>2</sub> O: 2,5 l/m <sup>2</sup>	één werkgang, ook potentie rond obstakels	ja	0,15-0,30
Opnemen en uitzeven	xx	ca 750	ca 250	xx / hv / y	x/ slib	halfverharding	nee	0,40 / 3 jr
Thermisch beschadigen								
Stootbranden (heet gas)	x	300-860	460 - 1.830	xx/ev,hv/yyy	xx/ brandgevaar	pleksgewijs en verder	ja	0,03-0,07
Infraroodstraling	x	180-500	600 - 2.000	xx/ev,hv/y	xx/ brandgevaar	pleksgewijs	ja	0,05-0,10
Stomen (heet water)	x	110-450	300 - 3.000	xx/a,ev,hv/yyy	xx/ h <sub>2</sub> O: 1-8 l/m <sup>2</sup>	matig, grotere units	ja	0,17-0,68
Strijken (heet object)	x onb.	onbekend	mogelijk laag	xx/ev,hv/y	x	comb. met branden	beperkt	Laag
Elektrocutie	x	mogelijk hoog	waarschijnlijk laag	xx/a,ev,hv/yyy	xx/ brandgevaar	mogelijk goed, maar duur	ja	Hoog
Magnetronstraling	xx onb.	zeer laag	> 3.500	onbekend	xxx.	slecht	beperkt	zeer hoog
UV-straling	x	100-300	> 1.500	xx/a,ev,hv/y	xx/ gevaar voor ogen	opvoeren straling/m <sup>2</sup>	beperkt	onbekend
Thermisch verwijderen								
IR-straling, gefocusseerd	x	zeer laag	mogelijk laag	xx/ev, hv / y	xx/ brandgevaar	voorlopig niet	ja	0,12-0,28
Laserbestraling	x	zeer laag	mogelijk laag	xx/ev, hv/ yy	xx	voorlopig niet	noodzaak	hoog

<sup>1</sup> x = alleen effect op bovengrondse delen xx = mogelijk ook effect op ondergrondse delen / onb. = dosis-effect relatie onbekend

<sup>2</sup> x = beperkt xx = hele jaar door / a = asfalt ev = elementverharding hv = halfverharding / y = vlak terrein yy = rond obstakels yyy= beiden

<sup>3</sup> x = veilig xx = veilig, aandachtspunten xxx = onveilig, zorgelijk y = afspoelingsrisico

<sup>4</sup> per behandeling; betreden/berijden en vegen per keer.