

Onkruidsnijden met hogedruk waterstralen – Literatuurverkenning

Intern rapport

22-2-1999

D.A.G. Kurstjens

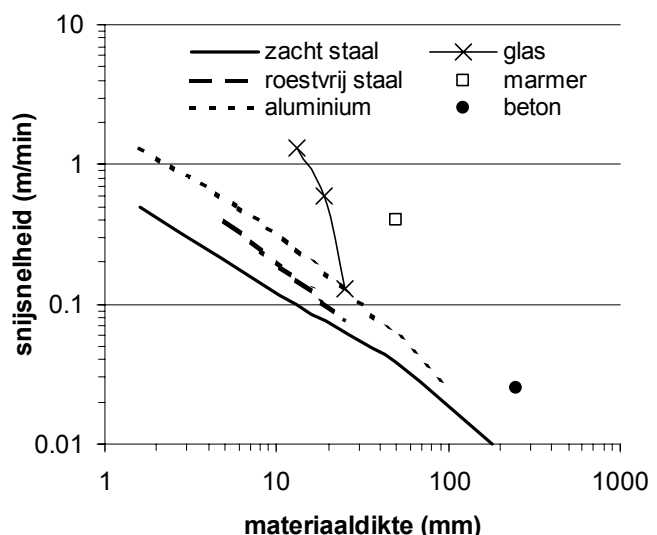
Toepassing van eroderende en niet-eroderende waterstralen

In het begin van de jaren 70 werden hogedruk waterstralers ontwikkeld waarmee velerlei relatief zachte materialen en niet-metalen konden worden gesneden. Deze techniek wordt toegepast in de levensmiddelenindustrie (snijden van vlees, kaas, koekjes, chocolade, pizza, pasta's (Henning 1998); aardappelen (Becker & Gray 1992), wortelen (Posselius & Conklin 1988)). In verband met ongewenste opname van water wordt bij het snijden van b.v. koekjes plantaardige olie gebruikt (Powell 1998). Diverse andere materialen kunnen met pure waterstralen worden gesneden (hout, voorbeelden in tabel 1). Ook medische toepassingen (snijden van levend weefsel) en landbouwkundige toepassingen (oogsten van sla (Schild & Harriott 1973); bloemkool (Tillett & Holt 1987), suikerriet (Valco et al 1989), lotuswortels (Endo et al 1981a, 1981b) en het verwijderen van jonge framboos-scheuten (Sidorovich 1985)) zijn onderzocht. De landbouwkundige toepassingen worden later in dit rapport uitvoeriger besproken.

De waterstraalsnijtechniek werd verder ontwikkeld door het toevoegen van eroderende stoffen (silicaat, granaat, aluminiumoxide) aan de waterstraal (0.25 – 2 kg/min), voordat deze het spuitstuk verlaat. Door de grote snelheid (500 m/s) veroorzaakt dit grit een gecontroleerde erosie van het materiaal in een smalle snede (≥ 2 mm). Met deze techniek ("abrasive water jet cutting, AWJ") kunnen ook metalen, glas, marmer, steen en beton worden gesneden (Powell 1998). AWJ is toepasbaar op dikke materialen (b.v. 18 cm dik staal, 25 cm dik beton), maar de snijnsnelheden zijn over het algemeen vrij laag (figuur 1). Omdat de snijnsnelheid afhankelijk is van o.a. de spuitstukdiameter, druk, type grit, gritdiameter zijn de in figuur 1 weergegeven snelheden slechts een indicatie. Voor industriële toepassingen is AWJ complementair aan CO₂ lasersnijden (Powell 1998). Omdat toevoeging van grit voor het afsnijden van onkruiden niet noodzakelijk lijkt, richt deze studie zich verder op niet-erosieve hogedruk waterstralen.

Tabel 1 Snijnsnelheden voor een hogedruk waterstraal zonder erosieve stoffen (Labus & Pilarski 1985 in Powell 1998).

| materiaal | dikte (mm) | snijnsnelheid (m/min) |
|-------------------------|------------|-----------------------|
| PVC | 0.76 | 18.3 |
| Polypropyleen | 2.03 | 3.7 |
| Polycarbonaat | 2.16 | 1.2 |
| Asbest | 18 | 91.2 |
| golfkarton | 7.87 | 20 |
| Leer | 1.5 | 76.2 |
| Rubber | 3.15 | 9.1 |
| Formica | 1.27 | 36.6 |
| Tapijt | 18.29 | 7.6 |
| Glas met epoxy laminaat | 1.77 | 2.5 |



Figuur 1 Typerende snijnsnelheden van eroderende hogedruk waterstralen (div. bronnen in Powell 1998)

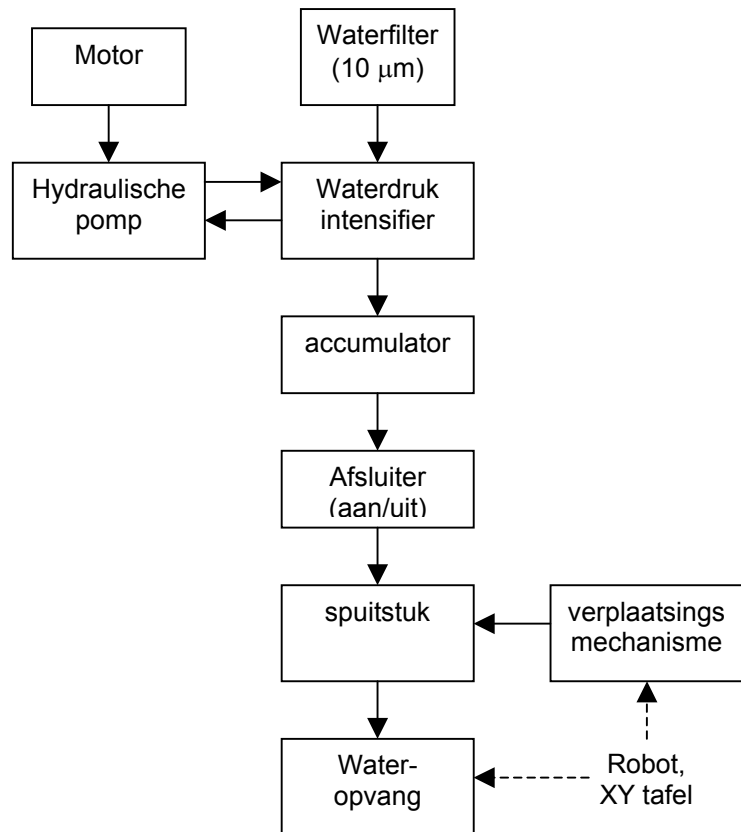
Apparatuur

Figuur 2 geeft het werkingsmechanisme van een waterstraalsnijder schematisch weer en figuur 4 toont een (computergestuurde) AWJ inrichting in werking. Een hydraulische pomp drijft via een zgn. intensifier de druk van het gefilterde water op tot ca. 4000 bar. De intensifier (figuur 3) brengt de druk van hydraulische olie in een cilinder met een groot zuigeroppervlak over op water in een cilinder met een kleiner zuigeroppervlak. Zodra de opgebouwde waterdruk de accumulatorendruk overtreft, ontsnapt het water door een terugslagklep uit de cilinder. 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. Door de pulserende supersonische waterstroom zijn waterstralers zeer luidruchtig. De onderhoudskosten zijn hoog door de beperkte levensduur van de bewegende delen in de intensifier (Valco et al 1989).

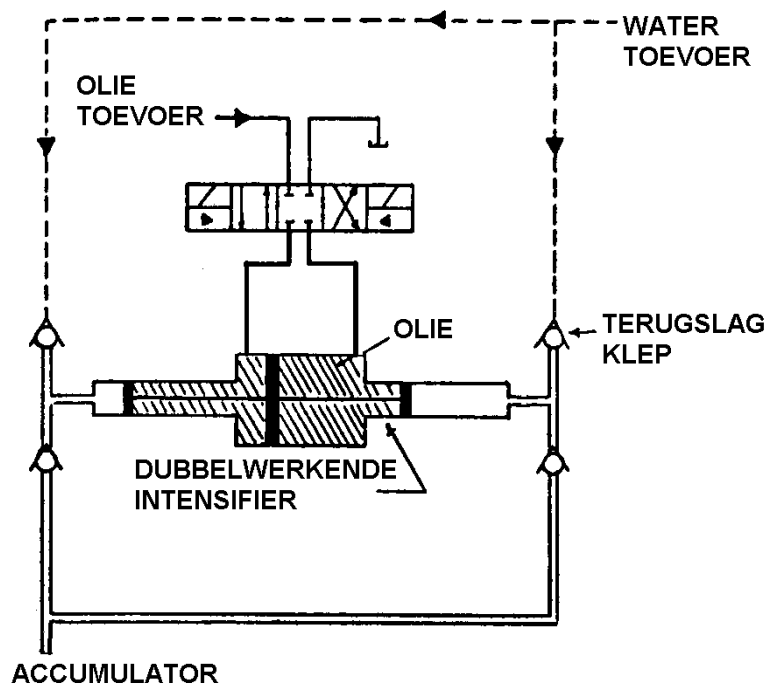
Het te snijden voorwerp of het spuitstuk worden met een robotarm of een computergestuurde XY tafel ten opzichte van elkaar bewogen.

Zheng et al (1996) geven een prestatie- en kostprijsvergelijking voor een CNC gestuurde Triumph CO₂ laser (3 kW input, 1234 W output) en een 37 kW HS-500 erosieve waterstraler (4 l/min, 3800 bar). Een laser kost ca. *f* 145.000 / kW, een goede CNC tafel + bijbehoren kost ca. *f* 400.000. Een waterstraler-systeem kost ca. *f* 290.000. Bij een levensduur van 20.000 uur zou een 2150 W laser met luchtondersteuning (i.p.v. O₂) *f* 53 per uur kosten en de waterstraler zonder erosieve stoffen *f* 29 / uur. Dit is inclusief onderhoud (resp. *f* 4.40 en *f* 7.85 per uur), elektriciteit (*f* 10.55 resp. *f* 5.15 / uur bij 20 ct / kWh), water (0.8 ct / m²), en lasergassen (*f* 1.32 / uur).

Behalve de uurkosten zijn ook de snij snelheden en de afschrijvingsduur in hoge mate bepalend voor de onkruidbestrijdingskosten per m².



Figuur 2 Schematische weergave van het werkingsprincipe van een hogedruk waterstraalsnijder (naar Hashish 1985 in Powell 1998).



Figuur 3 Waterdrukverhoging met een hydraulische intensifier (naar Valco et al 1989).

Werking

Een waterstraal zonder eroderende stoffen doet het te snijden materiaal bezwijken door een zeer hoge druk cq. impuls op een klein oppervlak. Er is fundamenteel onderzoek gedaan naar het werkingsprincipe van waterstraal-snijden, maar daar gaat dit rapport niet verder op in. Valco et al (1989) beschrijven de invloed van waterdruk, straaldiameter en de afstand tussen werkstuk en spuitstuk aan de hand van sterk vereenvoudigde vloeistof-mechanica.

De kracht van een continue straal niet-visceuze, niet-samendrukbare vloeistof die geen wrijving ondervindt van het spuitstuk, op een oppervlak loodrecht op de straal is:

$$F = mv, \quad \text{waarbij}$$

$$m = \rho Av \quad \text{en} \quad v = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

$$\text{geeft } F = 2AP \quad \text{of} \quad F = D\sqrt{2P\rho}$$

De vergelijking voor v volgt uit de wet van Bernoulli. ρ is de dichtheid van de vloeistof, A het oppervlak van de dwarsdoorsnede van de straal en D het bijbehorende debiet. De kinetische energie van die waterstraal is:

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad \text{zodat}$$

$$E = AP\sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad \text{of} \quad E = DP$$

In werkelijkheid ondervindt de straal 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 spuitstuk minder coherent. Op een afstand van 200 – 300 maal de straaldiameter valt de straal uiteen (figuur 5) en neemt de snijcapaciteit af.

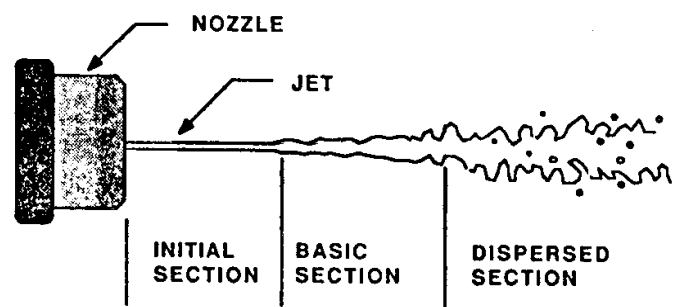
Spuitstukken met een scherpe opening zonder hals geven theoretisch de meest compacte stralen (Valco et al 1989). Bij het snijden van sla gaf het SDP spuitstuk uit figuur 6 de meest coherente straal bij een lage vermogensbehoefte, terwijl de "plug nozzle" onbruikbaar was (Schild & Harriott 1973).

Naast snelheidsverschillen in de straal door wrijving in het spuitstuk kunnen "zijwind" of het 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.

Door wrijving in het spuitstuk en luchtweerstand zullen de eerder gegeven formules de optredende kracht en de door het voorwerp opgevangen snij-energie minder goed beschrijven. Het is ook de vraag welke fysische parameters de snij-capaciteit van een minder coherente straal goed beschrijven.



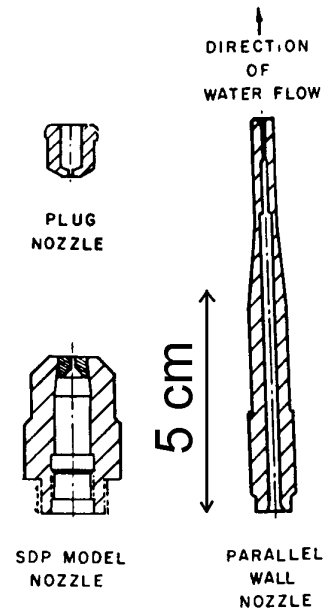
Figuur 4 Een CNC gestuurde erosieve waterstraler.



Figuur 5 De afnemende coherentie van een hogedruk waterstraal (Valco et al 1989).

Valco et al (1989) vond bij suikerrietstengels een goede relatie tussen de met de bovenstaande formules berekende kinetische energie (bij het spuitstuk) en de snij-efficiëntie (diepte snede / materiaaldikte)(figuur 7, rechts). De punten in de rechter grafiek van figuur 7 zijn echter gemiddelden over een brede reeks van snijsnelheden (1.6, 3.2 en 4.8 km/u) en spuitstuk-stengel afstanden (3, 8, 15 en 23 cm), zodat de invloed van waterstraal-coherentie niet zichtbaar is.

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 het spuitstuk 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 dootype en "windsnelheid" worden bepaald.



Snijden van zachte biologische materialen

Suikerriet

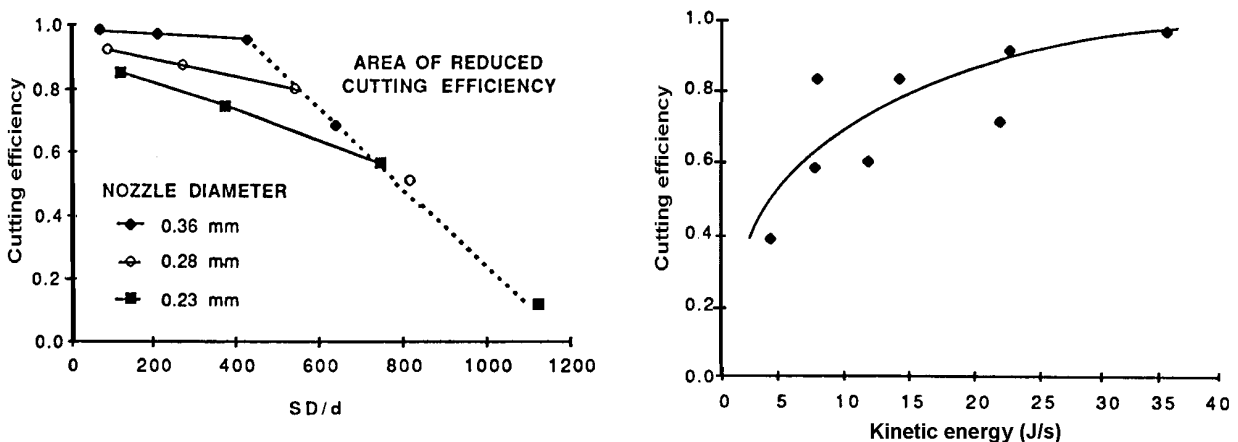
Om volgroeide suikerriet-stengels (dikte onbekend) volledig af te snijden bij 23 cm spuitstuk-stengel afstand zou een waterstraal met een kinetische energie van 39 J (bij het spuitstuk) nodig zijn. Dit kan worden bereikt met een spuitstuk van 0.41 – 0.46 mm diameter, die bij 3000 bar een debiet van 420 l/u levert (Valco et al 1989). Bij kleinere spuitstuk-stengel afstanden volstaat een kleiner spuitstuk en een lagere druk, dus een lager debiet (figuur 7 links). Bij het snijden met pure waterstralen is de afstand tussen spuitstuk en voorwerp meestal kleiner dan 10 cm.

Figuur 6 Drie typen spuitstukken voor het waterstraal-snijden van sla (Schield & Harriott 1973).

Sla

Schild & Harriott (1973) vergeleken 243 combinaties van spuitstuktype (3), spuitstukdiameter (0.38 – 2.0 mm), druk (69 – 414 bar), snijsnelheid (2.4 en 4.8 km/u) en spuitstuk-stengel kern afstand (3.2 en 6.4 cm) voor het selectief oogsten van sla. Tabel 2 geeft combinaties die 100% van de slaplanten volledig afsneden bij het laagste benodigd vermogen.

De "plug nozzle" werkte alleen als de afstand tussen slastronk en spuitstuk 1.5 cm of kleiner was. De "parallel wall nozzle" werkte ook op grotere afstanden maar is minder coherente en vergt een groter vermogen dan het SDP spuitstuk.



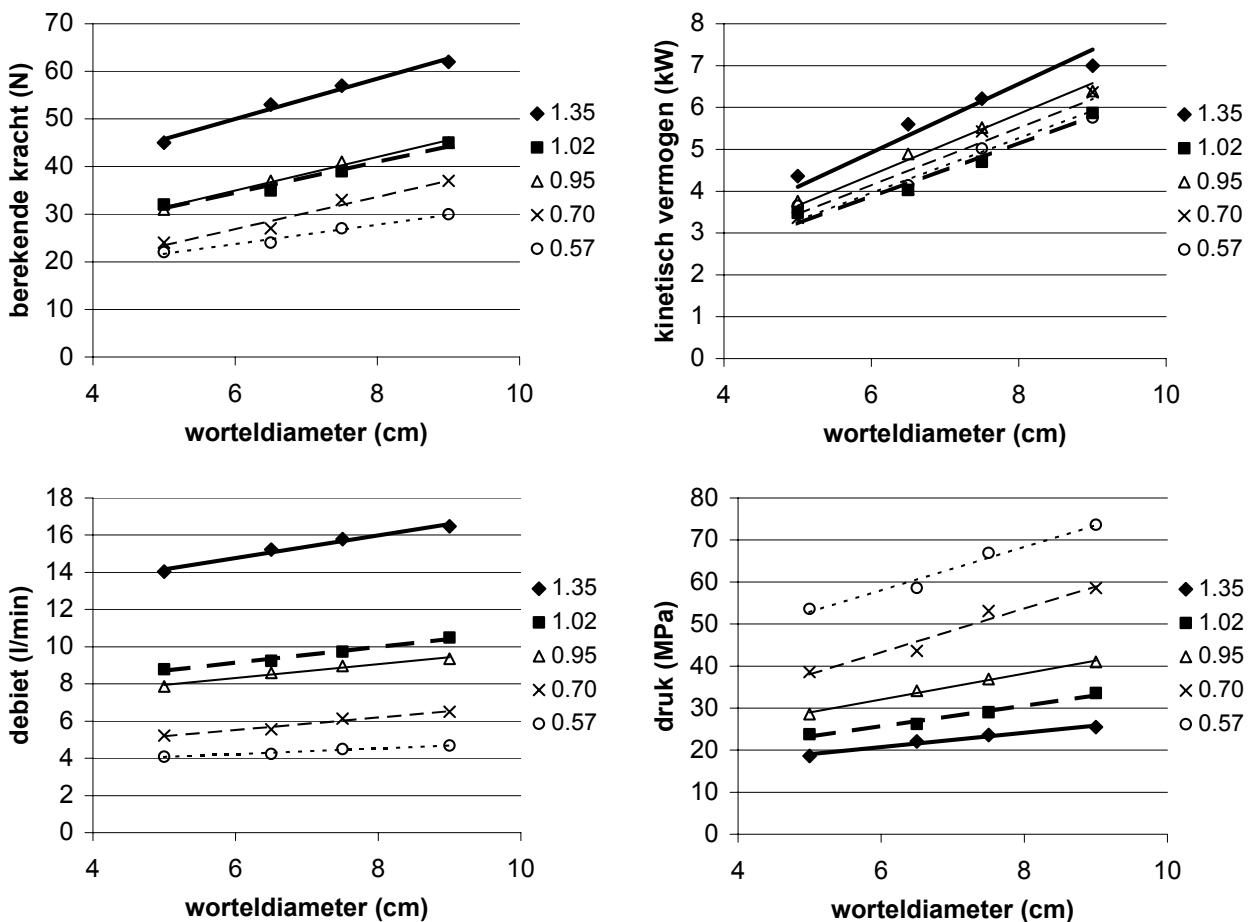
Figuur 7 Verband tussen de verhouding straaldiameter / spuitstuk-stengel-afstand (SD/d, links) en de berekende kinetische energie van de waterstraal bij het spuitstuk (rechts) op de snij-efficiëntie (=snede-diepte / materiaaldikte) bij suikerriet (Valco et al 1989). Data-punten zijn gemiddelden over snij-snelheid (links) en snijsnelheid en spuitstuk-stengel-afstand (rechts).

Tabel 2. Combinaties met een minimum waterstraalvermogen die sla volledig afsnijden (Schild & Harriott 1973). Spuitstukken zijn afgebeeld in figuur 6. Het benodigd vermogen is berekend aan de hand van druk, waterdebiet en een verondersteld pomp rendement van 50%.

| Spuitstuk | Snelheid (km/u) | Spuitstuk-stengelkern afstand (cm) | Spuitstuk-diameter (mm) | Druk (bar) | Debiet (l/uur) | Benodigd vermogen (kW) |
|---------------|-----------------|------------------------------------|-------------------------|------------|----------------|------------------------|
| Plug | 2.4 | 3.2 | 0.76 | 414 | 363 | 8.24 |
| Parallel wall | 2.4 | 3.2 | 1.0 | 414 | 795 | 17.9 |
| | 4.8 | 6.4 | 1.0 | 414 | 795 | 17.9 |
| SDP | 2.4 | 3.2 | 0.61 | 345 | 193 | 3.66 |
| | 4.8 | 6.4 | 1.1 | 276 | 536 | 8.09 |

Aardappel

Becker & Gray (1992) sneden rechthoekige aardappelblokjes van 2x2 cm doorsnede tot schijfjes bij uiteenlopende druk (690-3800 bar), spuitstukdiameter (0.076 – 0.584 mm) en snijsnelheid (0.016 – 0.61 m/s), bij een spuitstuk-aardappel afstand van 3.5 cm. Alleen bij de laagste druk (690 bar) en kleinste spuitstuk (0.076 mm) werden blokjes niet geheel doorgesneden (debiet ca. 5.5 l/uur).



Figuur 8 De invloed van de worteldiameter van winterpeen op de benodigde druk en debiet voor het waterstraalsnijden. Het kinetisch vermogen van de waterstraal en de kracht van de waterstraal zijn berekend met de eerder gegeven formules (naar Posselius & Conklin 1988).

Winterpeen

Posselius & Conklin (1988) bepaalden de druk die nodig is voor het afsnijden van de bovenkant van winterpeen (gemiddelde worteldiameter: 5, 6.5, 7.5 en 9 cm) met verschillende spuitstukken (gatdiameter 0.57, 0.70, 0.95, 1.02 en 1.35 mm) bij 10 cm spuitstuk-wortel afstand en 1 m/s snijsnelheid. Zij vonden een lineair verband tussen de logaritme van de druk (P, kPa), worteldiameter (dw, cm) en de gatdiameter van het spuitstuk (ds, mm) en een lineair verband tussen het berekend kinetisch vermogen van de waterstraal bij het spuitstuk (E, kW):

$$\text{Log (P)} = 4.2142 + 0.0399 \text{ dw} - 1.2245 \text{ ds} \quad (R^2 = 0.98)$$

$$E = -0.8699 + 1.2826 \text{ dw} + 0.669 \text{ ds} \quad (R^2 = 0.89)$$

Figuur 8 geeft de combinaties van druk en debiet weer die net voldoende zijn om de wortels volledig door te snijden. De lijnen in de grafiek rechtsboven gaan door de oorsprong, zodat er een lineair verband is tussen de benodigde kinetische energie en de worteldiameter, dat slechts in geringe mate afhangt van de spuitstukdiameter. Een spuitstuk met een grotere diameter snijdt bij een lagere druk maar vergt een groter debiet.

De door Posselius & Conklin (1988) en Schield & Harriott (1973) berekende kinetische waterstraal-energie voor het snijden van wortels resp. sla (met SDP nozzle) komen in grote lijnen overeen. Deze gegevens zijn echter in beperkte mate vergelijkbaar omdat de spuitstuk-voorwerp afstanden en spuitstukken verschillen.

Onkruiden en kleine planten

Warner (1975) probeerde jonge zaailingen van koolplanten net boven de grond af te snijden met een 1.5 kW pomp zonder intensifier. Bij een druk van 140 bar, 9.6 km/u snijsnelheid en 5 cm tussen spuitkop en plant sneed een waterstraal (0.35 mm spuitkopdiameter, 50 l/uur, 140 m/s) een groot deel van de planten af. Grotere zaailingen met taaiere vezels in de stengel werden gedeeltelijk beschadigd. In veldexperimenten bij een lagere snijsnelheid (2.4 km/u) kon de spuitkop onvoldoende nauwkeurig worden gericht, zodat slechts 60-70% van de zaailingen werd beschadigd. De behandeling had geen succes bij zaailingen van 5 weken oud met 3 mm stengels. Deze planten konden wel worden beschadigd door ze handmatig door de straal te halen, met ondersteuning aan beide zijden.

Behalve het interne rapport van Warner (1975) zijn er geen publicaties over het snijden van onkruiden bekend. Navraag bij fabrikanten (Flow, Ingersoll-Rand) en een online-search in niet-agrarische bibliografische bestanden (CAB, Agris, Biological Abstracts) zou mogelijk nog iets kunnen opleveren.

Het debiet en de druk die nodig is om onkruiden bij hogere druk te snijden alleen worden afgeleid als de gegevens van Posselius & Conklin mogen worden geëxtrapoleerd. Het doorsnijden van 0.5 cm dikke stengels zou dan een kinetisch waterstraalvermogen van ca. 750 W vergen. Bij een 0.57 mm spuitstuk zou dan ca. 350 bar druk en 62 l/uur volstaan.

Toepasbaarheid

Snijden met waterstralen heeft een aantal voor- (+) en nadelen (-) ten opzichte van mechanisch snijden met snel bewegende messen:

- + Waterstralen worden niet bot en raken niet beschadigd door stenen en obstakels.
- + Waterstralen blokkeren niet doordat plantenresten om roterende delen heen gewikkeld raken.
- + De spuitkoppen zijn compact, wendbaar en met weinig kracht nauwkeurig en snel bestuurbaar. Toepassing in combinatie met een CNC XY-tafel en robots zijn gangbaar in de industrie. Omdat (roterende) messen een bepaalde snelheid nodig hebben om te kunnen snijden vergen ze veel ruimte. Bij gestuurde op en neer gaande messen (b.v. in een gewasrij) levert het versnellen en vertragen (massatraagheid) problemen op en een nauwkeurige positionering moeilijk.
- + De op het te snijden voorwerp uitgeoefende krachten zijn vrij laag. Het is echter niet duidelijk of de kracht klein genoeg is om onkruiden niet "omver te spoelen" als de straal de plant te hoog raakt (zoals in experimenten van Warner (1975)).
- Waterstralers hebben een gevaarlijk hoog geluidsniveau (nog geen kwantitatieve gegevens gevonden). Grote energiebehoefte (gangbare installaties ca. 30 kW voor een enkele waterstraal).

- Hoge aanschafprijs (een volledig systeem van 30 kW, 3800 bar, met twee erosieve waterstralen op een computergestuurde portaalarm: ca f 200.000). Hoge (onderhouds) kosten van bewegende delen in de intensifier.
- In verband met de veiligheid dienen de onschuldig ogende waterstralen voldoende te zijn afgeschermd.
- De beschikbaarheid van water op voertuigen zou een beperking kunnen zijn als voertuigen op landbouwgrond moeten rijden. Omdat een 6-rijige machine voor onkruidbestrijding in de rij hooguit 600 l /uur zou gebruiken, zal de draagkracht van de grond en de beschikbaarheid van water waarschijnlijk geen problemen opleveren. In stedelijke gebieden is draagkracht van de grond sowieso geen probleem en kan men bij brandkranen water tanken.
- De waterstraal zou grond tussen tegels of klinkers weg kunnen spoelen, hetgeen de verharding destabiliseert. Het is niet duidelijk of dit optreedt bij een klein debiet en een nagenoeg horizontale straal die afketst tegen het tegeloppervlak. Bij niet-verharde paden zou de waterstraal grond tussen schelpen of grind kunnen wegspoelen. Bij toepassingen in de landbouw zou de waterstraal de hergroei van onkruiden kunnen stimuleren.
- De waterstraal moet zeer nauwkeurig in drie dimensies worden gestuurd. Hoewel de robotbesturingstechniek in de industrie al ver ontwikkeld is, vormen de mogelijkheden voor het nauwkeurig bepalen van het beoogde snijpunt bij ingewikkelde 3D-plantstructuren op onregelmatige oppervlakken waarschijnlijk de grootste beperking. De ontwikkeling en geavanceerde sensor- en besturingstechniek is bovendien kostbaar.

Als een druk van ongeveer 250 bar volstaat is de dure, lawaaierige, onderhoudsgevoelige intensifier overbodig en worden de eerste drie nadelen tenietgedaan. Als bovendien het besturingsvraagstuk kan worden opgelost zou dit waterstralen een aantrekkelijk alternatief kunnen maken voor borstelen op verhardingen of als actuator voor onkruidbestrijding in gewasrijen.

Conclusies en aanbevelingen

- Het afsnijden van planten met hogedruk waterstralen is mogelijk en de waterstraaltechnologie is ver ontwikkeld en wordt breed toegepast in de industrie.
- Het is nog niet duidelijk welke drukken en debieten volstaan voor de diverse onkruidsoorten en –stadia. Onderzoek hiernaar is een belangrijk onderdeel van een verdere haalbaarheidstudie, omdat het niet duidelijk is of zeer hoge drukken noodzakelijk zijn voor voldoende snijdende werking en of het hogere waterdebiet bij lage drukken aanvaardbaar is.
- Nauwkeurige automatische besturingssystemen zijn onontbeerlijk voor de positionering van spuitkoppen. Nadere inventarisatie van inpasbare technologie is nodig, in combinatie met onderzoek naar de benodigde positioneringsnauwkeurigheid.

Literatuur

- Becker R & Gray GM (1992) Evaluation of a water jet cutting system for slicing potatoes. *Journal of Food Science* 57: 1, 132-137.
- Endo S, Shibano Y, Sasao A et al (1981a) Studies on the development of a lotus-roots [Nelumbonaceae] harvester by water jet, 1: Trial manufacture of a lotus-roots harvester mounting water pump and its performance. *Journal of the Society of Agricultural Machinery (Japan)* 43: 1, 51-57. (geen abstract)
- Endo S, Shibano Y, Sasao A (1981b) Studies on the development of a lotus-roots harvester by water jet, 2: Trial manufacture of a lotus-roots harvester using a stationary water pump and its performance. *Journal of the Society of Agricultural Machinery (Japan)* 43: 2, 195-201. (geen abstract)
- Hashish M (1985) *Application of abrasive water jets to metal cutting*. In: Proceedings Conference Non Traditional Machining, Ohio, II, USA, December 1985.
- Henning A (1998) Cutting with high-pressure jet in the food industry. *Fleischwirtschaft* 78: 1, 43-45. (abstract)

- Labus TJ & Pilarski R (1985) *Fluid jet technology for industrial applications*. In: Proceedings Conference Non Traditional Machining, Ohio, IL, USA, December 1985.
- Posselius JH Jr & Conklin GT (1988) Crowing carrots with a high pressure water jet. *Applied Engineering in Agriculture* 4: 4, 340-343, ASAE paper 86-6550.
- Powell J (1998) *CO₂ laser cutting*. 2nd edn. Springer Verlag, Berlin.
- Schild M & Harriott BL (1973) Cutting lettuce stems with a water jet. *Transactions of the ASAE* 16: 3 440-442.
- Sidorovich AS (1985) Methods for removing young shoots in fruiting raspberries. *Seleksiya i Agrotehnika Plodovo Yagodnykh i Dekorativnykh Kul'tur 1985*, 102-112. (abstract)
- Tillett ND & Holt JB (1987) *Water jet cutting of cauliflower stems for mechanical harvesting – a feasibility study*. Divisional Note DN 1402, AFRC Institute of Engineering Research, UK. 33p (abstract)
- Valco TD, Coble CG, Ruff JH (1989) Water jet cutting of sugarcane. *Transactions of the ASAE* 32: 2, 373-378.
- Warner MGR (1975) *High speed thinning of rowcrops using water jet hoeing*. Note 60/1608, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, UK
- Zheng HY, Han ZZ, Chen ZD, Chen WL, Yeo S (1996) Quality and cost comparisons between laser and waterjet cutting. *Journal of Materials Processing Technology* 62, 294-298.
-