



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2012 – 2013

## Eco-efficiënte en effectieve onkruidbestrijding met heet water

**Sven Bogaert**

Promotor: dr. ir. B. De Cauwer

Tutor: ir. S. Claerhout

Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van  
Master in de bio-ingenieurswetenschappen: Landbouwkunde

De auteur en de promotor geven de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor persoonlijk gebruik.

Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting uitdrukkelijk de bron te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie.

The author and the promotor give the permission to use this thesis for consultation and to copy parts of it for personal use.

Any other use is subject to the copyright laws, more specifically the source must be extensively quoted when citing results from this thesis.

Gent, 22 augustus 2013.

**dr. ir. B. De Cauwer**

**Sven Bogaert**

**ir. S. Claerhout**

# Woord vooraf

Hier is ze dan! Na meer dan een jaar schrijven, zwoegen en zweten kan ik met trots mijn masterproef aan u voorstellen. Het horen van de harde en toch ook mooie verhalen van voorgangers over hun masterproef bleken niet minder waar. Ook mijn verhaal is er eentje met hard werk, vreugde en plezier en gevloek en frustraties. Ik kijk dan ook met een blij en opgelucht gevoel terug naar de periode op de proefhoeve in Melle en de talloze uren achter mijn pc. Om mijn verhaal te vormen en een mooi einde te bezorgen werd ik door talloze mensen ondersteund, die wil ik dan ook graag eens extra in de bloemetjes zetten.

Allereerst dien ik mijn promotor, dr. ir. Benny De Cauwer, en begeleidster, ir. Sofie Claerhout, uitgebreid te bedanken voor hun helpende handen, voor het kritisch verbeteren en me te begeleiden (met het nodige geduld) bij het schrijven van deze masterproef. Zonder hen zou deze masterproef niet geworden zijn tot wat ze nu is.

Daarnaast wil ik ook dhr. Chris Bekaert, medewerker op de proefhoeve te Melle, bedanken voor het opstellen van de proeven en de hulp en gezelschap bij het oogsten.

Ook wil ik de firma WAVE Europe en de Van de Haar Groep en hun medewerkers, in het bijzonder de heren Peter en Henk van de Haar, bedanken voor het ontwikkelen en beschikbaar stellen van het experimenteel spuittoestel waarmee de experimenten werden uitgevoerd. Zonder hen zou het onmogelijk geweest zijn de behandelingen uit te voeren.

Een speciaal woord van dank richt ik aan mijn ouders voor het mogelijk maken om verder te studeren. Ik wil hen en mijn broers, Dieter en Hannes, ook bedanken voor de hulp en steun die ik gedurende mijn volledige studentencarrière, in goede en slechte tijden, heb mogen ervaren.

Tenslotte wil ik ook mijn toffe collega's, bedanken voor de mooie tijden die ik met hen heb kunnen beleven. Door hun gezelschap in de lessen, samenwerking met de vele taken, collegiale steun gedurende examenperiodes nemen de afgelopen 5 jaar voor altijd een speciale plaats in mijn geheugen.

Het is gedaan! Tijd voor een nieuw hoofdstuk in mijn levensverhaal!

Sven Bogaert,  
Oostende, 22 augustus 2013

# Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	I
Lijst van afkortingen .....	IV
Samenvatting.....	V
1. Inleiding .....	1
2. Literatuurstudie.....	3
2.1. Onkruidbestrijding op verharde oppervlakken .....	3
2.1.1. Ongewenstheid van onkruiden voorkomend op verhardingen .....	3
2.1.2. Soorten verhardingen.....	4
2.1.3. Onkruidflora op verhardingen.....	4
2.1.3.1. Indeling volgens groeiomstandigheden .....	4
2.1.3.2. Indeling volgens levenscyclus.....	5
2.1.4. Preventieve maatregelen .....	7
2.1.4.1. Ontwerp en uitvoering .....	7
2.1.4.2. Preventief veegbeheer .....	10
2.1.5. Curatieve maatregelen .....	11
2.1.5.1. Chemische onkruidbestrijding.....	11
2.1.5.2. Mechanische onkruidbestrijding.....	12
2.1.5.3. Thermische onkruidbestrijding .....	14
2.1.6. Geïntegreerde en duurzame onkruidbeheersing, een noodzaak .....	15
2.1.6.1. Principe.....	15
2.1.6.2. Milieu-impact .....	16
2.2. Gevalstudie: heet water .....	19
2.2.1. Warmteoverdracht.....	19
2.2.2. Effectiviteit .....	22
2.2.2.1. Definitie .....	22
2.2.2.2. Invloedsfactoren.....	22
2.2.3. Eco-efficiëntie.....	25
2.2.3.1. Energieoverdrachtsrendement .....	25

2.2.3.2.	Invloedsfactoren.....	26
2.2.4.	Rekenvoorbeeld energieverbruik.....	28
3.	Materiaal en methoden .....	31
3.1.	Materiaal .....	31
3.1.1.	Gebruikt substraat.....	31
3.1.2.	Gebruikte populaties.....	31
3.1.3.	Heetwaterbehandeling.....	33
3.2.	Experimenten .....	35
3.2.1.	Experiment 1: Invloed van de plantensoort, het ontwikkelingsstadium en de watertemperatuur op de effectiviteit van heet water.....	35
3.2.1.1.	Doelstelling.....	35
3.2.1.2.	Proefopzet .....	36
3.2.2.	Experiment 2: Effectieve en eco-efficiënte bestrijdingsfrequentie .....	37
3.2.2.1.	Doelstelling.....	37
3.2.2.2.	Proefopzet .....	37
3.2.3.	Experiment 3: Intra-dag variatie in gevoeligheid ten aanzien van heet water .....	39
3.2.3.1.	Doelstelling.....	39
3.2.3.2.	Proefopzet .....	39
3.2.4.	Metingen .....	40
3.2.4.1.	Bedekking door de levende biomassa.....	40
3.2.4.2.	Drooggewicht van de levende biomassa.....	42
3.2.4.3.	Plantkarakteristieken .....	42
3.2.5.	Statistische dataverwerking .....	44
4.	Resultaten en discussie .....	46
4.1.	Experiment 1 .....	46
4.1.1.	Resultaten.....	46
4.1.2.	Discussie .....	55
4.2.	Experiment 2 .....	57
4.2.1.	Resultaten.....	57
4.2.2.	Discussie .....	67
4.3.	Experiment 3 .....	69
4.3.1.	Resultaten.....	69

4.3.2. Discussie .....	73
5. Besluit .....	74
6. Verder onderzoek.....	77
7. Referentielijst .....	788
Bijlagen .....	83

## Lijst van afkortingen

AMINAL	Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer
DOB	Duurzaam OnkruidBeheer op verhardingen
ED <sub>50</sub>	Effectieve Dosis 50: de energiedosis vereist om de biomassa of bedekking met 50% te reduceren
ED <sub>70</sub>	Effectieve Dosis 70: de energiedosis vereist om de biomassa of bedekking met 70% te reduceren
ED <sub>90</sub>	Effectieve Dosis 90: de energiedosis vereist om de biomassa of bedekking met 90% te reduceren
OCW	OpzoekingsCentrum voor de Wegenbouw
RWC	Relative Water Content
SE	Standaardfout (Standard Error)
SI(x,x)	SelectiviteitsIndex: de ratio tussen ED <sub>x</sub> -waarden van twee verschillende dosis-respons curves
VMM	Vlaamse MilieuMaatschappij

# Samenvatting

De effectiviteit (mate waarin het onkruid bestreden wordt) en eco-efficiëntie (zo veel mogelijk onkruid bestrijden met een zo laag mogelijke energie- en waterverbruik) van onkruidbestrijding met heet water worden beïnvloed door biologische factoren, technologische factoren en het bestrijdingssysteem. Deze Masterproef bestudeert deze invloedsfactoren om te komen tot aanbevelingen voor een effectieve en eco-efficiënte onkruidbestrijding met heet water.

Allereerst werden de biologische factoren: het ontwikkelingsstadium, de plantensoort en de dagvariatie in gevoeligheid t.a.v. heet water bestudeerd.

De dosis-responsproeven tonen aan dat indien er een verschil in gevoeligheid was tussen de ontwikkelingsstadia (39, 60 en 81 dagen oude planten), het jongste ontwikkelingsstadium (39d oud) het gevoeligst is. Bij sommige soorten (grote weegbree, Engels raaigras en straatgras) is er geen significant verschil in gevoeligheid tussen de ontwikkelingsstadia. Bij Canadese fijnstraal, gewone hoornbloem en paardenbloem is dit echter wel het geval. Hierbij is het jongste ontwikkelingsstadium, bij een reductie van 50% in bovengrondse biomassa, dubbel tot vier keer zo gevoelig als het oudste ontwikkelingsstadium (81d oud). Vermits een jonger stadium doorgaans gevoeliger is, is het om redenen van effectiviteit en eco-efficiëntie raadzaam onkruiden in een jong groeistadium (39 dagen of jonger) te behandelen.

Er zijn duidelijke interspecifieke verschillen in gevoeligheid ten aanzien van eenmalige behandeling met heet water. Canadese fijnstraal en paardenbloem zijn zowel in het jongste als oudste ontwikkelingsstadium de gevoeligste soorten. Tot de intermediair gevoelige soorten behoren gewone hoornbloem, grote weegbree en witte klaver. De ongevoeligste soorten zijn Engels raaigras en straatgras. De gevoeligste soorten zijn tot drie keer gevoeliger dan de ongevoelige soorten. Deze gevoeligheid houdt enkel rekening met de kortetermijnrespons (eenmalige behandeling) van de bovengrondse plantendelen op een heetwaterbehandeling en zegt niets over de mogelijkheden tot hergroei, na herhaaldelijk behandelen. De verschillen in gevoeligheid zijn wellicht te wijten aan de morfologische en fysiologische kenmerken van de soorten. Zo bezitten de gevoeligste soorten grote contactoppervlakken en/of horizontaal georiënteerde, dunne bladeren. Deze kenmerken zijn gunstig voor een effectieve warmteoverdracht. Grassen daarentegen vertonen smalle bladeren en een erecte bladstand. Deze kenmerken verlagen de warmteoverdracht tussen het water en de plant in sterke mate. De energiedosis dient bijgevolg gekozen te worden in functie van de aanwezige flora op een verharding. Paardenbloem, gewone hoornbloem en Engels raaigras van 46 dagen oud vertonen een duidelijk patroon in gevoeligheid gedurende de dag. Deze soorten zijn, in de periode van 2 tot 12u na zonsopkomst, het minst gevoelig in de ochtend (2u na zonsopkomst). Naar de middag (7u na zonsopkomst) toe worden de planten gevoeliger. Bij gewone hoornbloem zijn de planten het gevoeligst gedurende de middag (7u na zonsopkomst), terwijl bij paardenbloem en Engels raaigras de gevoeligheid verder stijgt tussen de middag en avond, om een maximale gevoeligheid, binnen het bereik van de metingen, te bereiken gedurende de avond (12u na zonsopkomst). De planten zijn op hun maximale



gevoeligheid ongeveer dubbel zo gevoelig als gedurende de ochtend. Om een effectieve en eco-efficiënte bestrijding uit te voeren dienen de onkruiden dus best pas vanaf de middag (vanaf 7u na zonsopkomst) bestreden te worden. In de praktijk is het echter niet altijd mogelijk alle verhardingen enkel gedurende de middag te bestrijden, in dat geval dienen bij voorkeur de verhardingen met grote bedekkingen aan weinig heetwatergevoelige plantensoorten (bv. grassen) vanaf de middag (7 tot 12u na zonsopkomst) behandeld te worden.

Daarnaast werd de technologische factor watertemperatuur bestudeerd. Dosis-responsproeven tonen aan dat een heetwaterbehandeling met een hoge watertemperatuur de beste garantie biedt op een effectieve onkruidbestrijding. Zo zorgt een heetwatertemperatuur van 98°C bij het jongste ontwikkelingsstadium (39 dagen oud) steeds voor de hoogste effectiviteit. Bij het oudste ontwikkelingsstadium (81 dagen oud) is er niet altijd een verschil in effectiviteit tussen de verschillende watertemperaturen (98, 88 en 78°C), maar indien er een verschil is, zorgt de hoogste watertemperatuur steeds voor de effectiefste heetwaterbestrijding van onkruiden. Door onkruiden te behandelen met water van 98°C kan het energieverbruik met een factor 2 tot 6 bij behandeling van het jongste groeistadium en een factor 2 tot 3 bij behandeling van het oudste ontwikkelingsstadium verlaagd worden om hetzelfde bestrijdingseffect (50 tot 90% reductie) te bekomen als bij toepassing van water van 78 of 88°C.

Finaal werd de invloed van het bestrijdingsinterval (of bestrijdingsfrequentie) en energiedosis per beurt bestudeerd over een periode van 12 weken. Het effectiefste behandelingsinterval inzake de reductie in totale biomassa is afhankelijk van de soort. Bij grote weegbree, paardenbloem en Engels raaigras zorgen respectievelijk het behandelingsinterval van 2, 3 en 3 weken bij toepassing van respectievelijk 983, 819 en 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling voor de grootste reductie (respectievelijk 89, 69 en 73% t.o.v. de onbehandelde controle) in totale droge biomassa, na 12 weken behandelen. Afhankelijk van de soort is er echter niet altijd een groot verschil tussen de behandelingsintervallen van 2, 3 of 4 weken. Voor een eco-efficiënte en effectieve bestrijding (d.w.z. ongeveer 70% reductie in totale droge biomassa na 12 weken behandelen), opteert men bij paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras best voor een driewekelijkse bestrijding aan 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandelingsbeurt.

In een tijdspanne van 12 weken is het bij de geteste cumulatieve energiedosisen (0 tot 3934 kJ/m<sup>2</sup>) onmogelijk om grote weegbree, paardenbloem en Engels raaigras van 86 dagen oud volledig uit te putten. Gedurende de proefperiode van 12 weken wordt de totale droge biomassa, bij toepassing van het aanbevolen 3-wekelijkse behandeling met 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling, tot ongeveer 30% t.o.v. de onbehandelde controle gereduceerd. Wil men deze meerjarige onkruiden verder uitputten dan zal ook in het daaropvolgend groeiseizoen een strak behandelingsregime uitgevoerd moeten worden. Een tijdige start van de vervolghandelingen in het voorjaar en het aanhouden van een bestrijdingsinterval van 3 weken is hierbij aanbevolen.

# 1. Inleiding

Sedert lange tijd zijn steden en gemeenten bezig met het voorkomen en bestrijden van onkruiden op verhardingen. Onkruiden zorgen immers voor een ongewenst straatbeeld, veroorzaken schade aan de functionaliteit van de verharding en kunnen voor gezondheidsproblemen zorgen bij de mens (Benvenuti, 2004).

In Vlaanderen gebeurde de onkruidbestrijding voornamelijk op chemische wijze omwille van de hoge effectiviteit en lage kostprijs in vergelijking met niet-chemische technieken. Omwille van problemen met afspoeling van bestrijdingsmiddelen naar het grond- en oppervlaktewater en verhoudingsgewijs hoge emissie op verhardingen is er op 21 december 2001 door de Vlaamse Gemeenschap besloten dat er vanaf 1 januari 2004 een nulgebruik van chemische bestrijdingsmiddelen dient toegepast te worden op openbare verhardingen. Vermits het onmogelijk was om op alle openbare verhardingen in twee jaar over te schakelen tot een niet-chemische onkruidbestrijding konden steden en gemeenten een reductieprogramma opstellen (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2002). In dit reductieprogramma worden de doelstellingen en actieprogramma's om het middelenverbruik te reduceren duidelijk afgelijnd. In 2004 werd er besloten dat de reductieprogramma's uiterlijk op 31 december 2014 moeten uitgevoerd zijn (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2004). In maart 2013 is een laatste aanpassing doorgevoerd waarbij het verplicht nulgebruik uitgebreid is naar bepaalde niet-openbare verhardingen, zoals terreinen bij scholen en kinderopvangcentra (Vlaamse Overheid, 2013).

Vermits chemische bestrijdingstechnieken, behalve in extreme gevallen, niet meer toegelaten zijn vanaf 2015 dient een oplossing gezocht te worden in geïntegreerde en duurzame niet-chemische onkruidbestrijding. Hierbij wordt gebruik gemaakt van preventieve (goed ontwerp en aanleg, frequent vegen) en niet-chemisch curatieve technieken (mechanische en fysische technieken). De curatieve technieken worden op een oordeelkundige manier gecombineerd in zogenaamde bestrijdingssystemen om tot een doeltreffende (effectieve) en milieuvriendelijke (eco-efficiënte) onkruidbestrijding te komen (Boonen *et al.*, 2013). Binnen een geïntegreerd bestrijdingssysteem is het belangrijk iedere techniek zo optimaal mogelijk in te zetten. Optimalisatie van een techniek vereist enerzijds kennis omtrent drie effectiviteitsbeïnvloedende factoren met name de omgevingsfactoren (bv. neerslag), biologische factoren (bv. soort, ontwikkelingsstadium en waterstatus) en technologische factoren (bv. watertemperatuur). Anderzijds dient onderzocht te worden welke factoren, o.a. ingezette technieken, toegepaste energiedosis en gewenste veronkruidingslimiet, dienen aangenomen te worden om een zo laag mogelijk, maar eco-efficiënte bestrijdingsfrequentie te bekomen.

Deze masterproef richt zich op het onderzoeken van de eco-efficiëntie en effectiviteit van onkruidbestrijding door middel van heet water. Door de heetwatertechniek te optimaliseren, wordt zijn negatieve milieu-impact geminimaliseerd hetgeen toelaat de techniek nog duurzamer in te zetten binnen onkruidbeheersingssystemen.

De masterproef omvat een literatuurstudie en een onderzoeksluik. In de literatuurstudie zijn 2 delen te onderscheiden. Het eerste deel schetst een algemeen beeld over onkruidbestrijding op verharde oppervlakken, terwijl het tweede deel een gevalstudie is over onkruidbestrijding met heet water. In het

onderzoeksluik worden drie experimenten uitgevoerd en besproken. Via het eerste experiment wordt nagegaan welke heetwatertemperatuur het effectiefst en eco-efficiëntst is alsook welk ontwikkelingsstadium het gevoeligst is voor heet water. Eveneens wordt er in het eerst experiment onderzocht of er interspecifieke verschillen zijn in gevoeligheid t.a.v. heet water en welke effect de geteste energiedosissen enkele weken na de behandeling hebben op de reductie in biomassa van onkruiden. Het tweede experiment onderzoekt bij welk bestrijdingsinterval de grootste reductie in biomassa wordt bekomen, welke combinatie van bestrijdingsinterval en energiedosis het effectiefst en eco-efficiëntst is en of onkruiden via herhaaldelijke behandeling met heet water volledig gedood kunnen worden. Via het derde experiment wordt nagegaan of er een verschil is in gevoeligheid voor de heetwaterbestrijding doorheen de dag. Met behulp van dosis-respons curves en ANOVA worden  $ED_{50}$ ,  $ED_{70}$  en  $ED_{90}$ -waarden berekend en wordt het effect van verschillende behandelingen op de graad van onkruidbestrijding bestudeerd.

## 2. Literatuurstudie

### 2.1. Onkruidbestrijding op verharde oppervlakken

#### 2.1.1. Ongewenstheid van onkruiden voorkomend op verhardingen

Onkruiden zijn planten die niet gewenst zijn op de plaats van voorkomen (Harlan & de Wet, 1965). Deze plaats omhelst zowel beteelde (land-, bos- en tuinbouw) als niet-beteelde zones, waaronder verhardingen. Begroeiingen op verhardingen (voetpaden, fietspaden, wegen, ...) zijn voor zowel de gebruiker als de beheerder ongewenst. Onkruiden zijn namelijk onooglijk, beschadigen de functionaliteit van verhardingen en kunnen schadelijk zijn voor de volksgezondheid (Benvenuti, 2004).

De (on)ooglijkheid van onkruidbegroeiing in het straatbeeld<sup>1</sup> wordt beïnvloed door de onkruidhoogte en onkruidbedekking (d.w.z. % voegoppervlak bedekt door onkruiden). De onooglijkheid is het grootst bij hoge onkruidbedekking en hoog opgegroeide vegetatie. Deze beeldkwaliteit wordt in de praktijk uitgedrukt met een beeldscore (met cijfercodes) of een beeldklasse (met lettercodes). De beeldscore is gebaseerd op het onkruidbedekkingspercentage en de hoogte van de onkruiden en wordt uitgedrukt op een schaal van 2-10. Hoe hoger de beeldscore, hoe beter het straatbeeld en hoe lager de onkruiddruk (zie Tabel 1) (Fagot *et al.*, 2011). De beeldklasse is gebaseerd op het onkruidbedekkingspercentage, de onkruidhoogte en het aantal pollen aanwezig op de verhardingen (zie Tabel 2) (Boonen *et al.*, 2013). Functionele schade stelt de fysische hinder voor met betrekking tot de gebruiksfuncties van de verharding. Sterke veronkruiding verhoogt immers het slipgevaar, vermindert de zichtbaarheid (o.a. nabij verkeersborden) en waterafvoer (o.a. door verstopping van riolen) en beschadigt de constructie (o.a. opduwen verharding door wortelgroei) (Benvenuti, 2004). Sommige plantensoorten, in het bijzonder alsemambrosia (*Ambrosia artemisiifolia* L.), vele grassen (*Poaceae*), brandnetel (*Urticaceae*)– en weegbree-achtigen (*Plantaginaceae*) schaden de volksgezondheid doordat ze allergene pollen vrijstellen (Minero *et al.*, 1998; Grilli Caiola *et al.*, 2002; D'amato *et al.*, 2007).

**Tabel 1. Beeldscore op basis van onkruidbedekking (%) en hoogte van de onkruidvegetatie (cm) (Fagot *et al.*, 2011)**

onkruid- bedekking (%)	hoogte onkruidvegetatie (cm)				
	<1	1-3	4-6	7-10	>10
1-6	10	9	8	7	6
6-16	10	8	7	6	5
16-26	10	7	6	5	4
26-51	10	6	5	4	3
51-100	10	5	4	3	2

**Tabel 2. Beeldklasse op basis van onkruidbedekking (%), hoogte van de onkruidvegetatie (cm) en aantal pollen per 100 m<sup>2</sup> (Boonen *et al.*, 2013).**

beeld- klasse	onkruid- Bedekking (%)	hoogte onkruid- Vegetatie (cm)	aantal pollen per 100 m <sup>2</sup>
A+	0	0	0
A	≤ 5	≤ 25	0
B	≤ 15	≤ 50	≤ 100
C	≤ 25	≤ 100	≤ 200
D	> 25	> 100	> 200

<sup>1</sup> Visuele perceptie van de burger met betrekking tot de netheid van verhardingen.

## 2.1.2. Soorten verhardingen

Verhardingen kunnen onder drie types ingedeeld worden, namelijk gesloten, halfopen en open verhardingen (DOB, 2010a; VMM, 2012).

- **Gesloten verhardingen** zijn verhardingen zonder voegen (behalve eventuele uitzettingsvoegen) en zijn ter plaatse aangebracht, aanvankelijk plastisch materiaal (bv. asfalt of beton).
- **Halfopen verhardingen** zijn verhardingen met voegen. Deze verharding bestaat uit kleinschalige elementen (o.a. kasseien, straatstenen, trottoirtegels) die geordend zijn aangebracht.
- **Open verhardingen** zijn verhardingen uit losse, gestorte materialen (o.a. grind, steenslag, boomschors) of materialen met hygroscopisch karakter.

De gesloten verhardingen worden vooral toegepast voor het aanleggen van wegen en soms ook voor voetpaden. De halfopen verhardingen zijn het meest voorkomend bij voetpaden, parkings en pleinen. De open verhardingen worden vooral toegepast bij wandelpaden en fietspaden (Kortenhoff *et al.*, 2001). Het is de doelstelling van deze masterproef om de heetwatertechniek te optimaliseren voor het bestrijden van onkruiden op verhardingen in steden en gemeenten, waarbij de nadruk ligt op halfopen verhardingen.

## 2.1.3. Onkruidflora op verhardingen

Bij de ontwikkeling van een aangepaste onkruidbestrijdingstrategie is kennis van de onkruidbiologie onontbeerlijk. De onkruiden kunnen ingedeeld worden volgens de groeiomstandigheden of naargelang de levenscyclus (De Cauwer & Bulcke, 2011).

### 2.1.3.1. *Indeling volgens groeiomstandigheden*

De groeiomstandigheden van onkruiden op verhardingen zijn bijzonder divers. Talrijke micro-omgevingen komen voor met een groot aantal verschillende ecologische niches. Hierdoor is de onkruidflora op verhardingen bijzonder soortendivers (Benvenuti, 2004).

De aard van de onkruidflora die voorkomt in een ecologische niche wordt bepaald door de volgende invloedsfactoren: temperatuur, droogte, nitraatinhoud, lichtregime en compactiegraad van het groeimedium.

- **Temperatuur:** Steden worden vaak aanzien als 'warmte-eilanden'. De temperatuur in steden kan immers hoog oplopen door een complexe interactie van factoren, bijvoorbeeld het vrijkomen van antropogene warmte (verwarming huizen, warmteproductie wagens,...) (Oke & Maxwell, 1975). Op deze warmere plaatsen is er een selectiedruk naar thermofiele soorten, zoals gierstgrassen (Benvenuti, 2004; De Cauwer & Bulcke, 2011).
- **Droogte:** Droge niches zijn, door de combinatie van zon en een goede waterafvoer, terug te vinden in scheuren in het wegdek en tussen straatstenen. Droge niches herbergen talrijke

xerofyten, bijvoorbeeld varkensgras (*Polygonum aviculare* L.) door o.a. de aanwezigheid van een diepwortelende penwortel (Benvenuti, 2004; De Cauwer, 2011).

- **Nitraatinhoud** van het groeimedium: Bij niches waar bomen aanwezig zijn en de bladeren niet geruimd worden, vertoont het groeimedium (bv. het voegvullingssubstraat) een hogere nitraatinhoud. Deze hogere nitraatinhoud stimuleert nitrofiële onkruiden, zoals vogelmuur (*Stellaria media* L.) en grote brandnetel (*Urtica dioica* L.) (Benvenuti, 2004).
- **Lichtregime**: In verstedelijkte gebieden komen verschillende lichtregimes voor; zonnig, halfschaduw en schaduw. Deze hebben een significant effect op de soortensamenstelling. Zo is de aanwezigheid van straatgras (*Poa annua* L.) sterk gerelateerd aan schaduwrijke zones (Fagot *et al.*, 2011).
- **Compactiegraad**: Verhardingen worden vaak betreden of bereiden waardoor onkruiden moeten kunnen groeien en overleven in een sterk gecompecteerd groeimedium. Tredplanten, bijvoorbeeld grote weegbree (*Plantago major* subsp. *major* L.), paardenbloem (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.) en Engels raaigras (*Lolium perenne* L.), zijn bijzonder aangepast aan dergelijke omstandigheden. Enerzijds bevinden de groeimeristemen van tredplanten zich in de knoppen van de basale bladeren waardoor ze beschermd zijn tegen betreding (Benvenuti, 2004). Anderzijds vertonen sommige, bijvoorbeeld gewoon varkensgras (*Polygonum aviculare* L.), het vermogen tot hergroei uit axillaire knoppen indien de apex vernietigd is (Costea & Tardif, 2005).

### 2.1.3.2. Indeling volgens levenscyclus

Plantensoorten kunnen ingedeeld worden volgens hun levensduur (éénjarig, tweejarig en overblijvend) en aantal zaadlobben (monocotyl en dicotyl). Op verhardingen komen hogere (éénjarige, twejarige en overblijvende mono- en dicotylen) en lagere (mossen en algen) planten voor. Hogere planten zijn qua belangrijkheid<sup>2</sup> de belangrijkste onkruidgroep op Vlaamse verhardingen (Fagot *et al.*, 2011). Binnen de groep van hogere planten vertonen de overblijvende onkruiden een grotere soortenrijkdom dan de één- en tweejarigen. Het belangrijkepercentage van een individuele plantensoort is sterk afhankelijk van de plaatselijke omgevingsomstandigheden (o.a. toegepaste verharding en ligging) (Fagot *et al.*, 2011).

Overblijvende onkruiden hebben hun succes vooral te wijten aan hun vermogen om vegetatieve voortplantingsstructuren te vormen en reservestoffen in ondergrondse plantendelen op te slaan. De meest succesvolle overblijvende onkruiden op verhardingen planten zich zowel vegetatief (knollen, broedknoppen, bollen, rhizomen, worteluitlopers, bovengrondse uitlopers,...) als generatief (zaden) voort: éénmaal gekiemd, weerstaan zij meerdere jaren aan stressrijke omstandigheden zoals droogte, hitte, zout, betreding, ... (Benvenuti, 2004).

Het succes van één- en tweejarigen op verhardingen is sterk afhankelijk van de gunstige kiemingscondities (voldoende vocht, licht,...). Zo kunnen op verhardingen droge niches voorkomen, die sterk ongunstig zijn voor de kieming van de zaden, met een beperkt voorkomen van één- en tweejarigen als gevolg (Benvenuti, 2004; Fagot *et al.*, 2011). De op verhardingen meest succesvolle éénjarigen, met

---

<sup>2</sup> Indirecte maat voor biomassa van een individuele soort of soortengroep als fractie van de totale onkruidbiomassa van alle aanwezige onkruiden. Soorten/groepen met een hoger belang in termen van biomassa wegen zwaarder door in de berekening van het soortenbelang.

name klein kruiskruid (*Senecio vulgaris* L.), straatgras (*Poa annua* L.) en Canadese fijnstraal (*Conyza canadensis* L.) hebben één of meerdere van de volgende biologische kenmerken gemeen: snelle kieming, kiempatroon zonder periodiciteit, geringe zaaddormantie of gemakkelijke zaadverspreiding via wind (Fagot *et al.*, 2011).

De top 20 van de meest voorkomende onkruidsoorten op Vlaamse verhardingen worden in Tabel 3 weergegeven. Hierbij is te zien dat de plantensoorten die tot de samengesteldbloemigen (*Asteraceae*) en grassen (*Poaceae*) behoren, het meest voorkomen op verhardingen (Fagot *et al.*, 2011). Vele *Asteraceae* verspreiden hun zaden via de wind (anemochorie) hetgeen hun succes op verhardingen verklaart. Zaadverspreiding over lange afstand blijft immers belangrijk om nieuwe niches te koloniseren (Benvenuti, 2004).

**Tabel 3. De top 20 van meest voorkomende onkruidensoorten op Vlaamse verhardingen met Nederlandse en wetenschappelijke naam, de frequentie van voorkomen op een totaal van 163 locaties, de familie waartoe ze behoren, de groep (M: monocotyl, D: dicotyl) en hun levenscyclus (van der Meijden, R. (2008); Fagot *et al.*, 2011).**

rang nr.	nederlandse soortnaam	wetenschappelijke soortnaam	frequentie van voorkomen <sup>3</sup> (%)	familie	groep	levensduur
1	Straatgras	<i>Poa annua</i> L.	90.8	<i>Poaceae</i>	M	Eénjarig
2	Liggende vetmuur	<i>Sagina procumbens</i> L.	79.8	<i>Caryophyllaceae</i>	D	Overblijvend
3	Canadese fijnstraal	<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	73.6	<i>Asteraceae</i>	D	Eénjarig
4	Paardenbloem	<i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.	63.8	<i>Asteraceae</i>	D	Overblijvend
5	Grote weegbree	<i>Plantago major</i> L.	57.1	<i>Plantaginaceae</i>	D	Overblijvend
6	Gewoon varkensgras	<i>Polygonum aviculare</i> L.	46.0	<i>Polygonaceae</i>	D	Eénjarig
7	Basterdwederik	<i>Epilobium</i> spp. <i>Cerastium fontanum</i>	42.9	<i>Onagraceae</i>	D	Overblijvend
8	Gewone hoornbloem	subsp. <i>vulgare</i> (Hartm.) Greuter & Burdet	41.1	<i>Caryophyllaceae</i>	D	Overblijvend
9	Gewone melkdistel	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	36.2	<i>Asteraceae</i>	D	Eén-/tweejarig
10	Gewoon struisgras	<i>Agrostis capillaris</i> L.	26.5	<i>Poaceae</i>	M	Overblijvend
11	Klein kruiskruid	<i>Senecio vulgaris</i> L.	26.4	<i>Asteraceae</i>	D	Eénjarig
12	Engels raaigras	<i>Lolium perenne</i> L.	23.9	<i>Poaceae</i>	M	Overblijvend
13	Madeliefje	<i>Bellis perennis</i> L.	23.3	<i>Asteraceae</i>	D	Overblijvend
14	Zachte ooievaarsbek	<i>Geranium molle</i> L.	21.5	<i>Geraniaceae</i>	D	Eénjarig
15	Witte klaver	<i>Trifolium repens</i> L.	19.0	<i>Fabaceae</i>	D	Overblijvend
16	Kleine veldkers	<i>Cardamine hirsuta</i> L.	15.3	<i>Brassicaceae</i>	D	Eénjarig
17	Vogelmuur	<i>Stellaria media</i> L.	14.1	<i>Caryophyllaceae</i>	D	Eénjarig
18	Rood zwenkgras	<i>Festuca rubra</i> L.	9.8	<i>Poaceae</i>	M	Overblijvend
19	Smalle weegbree	<i>Plantago lanceolata</i> L.	9.8	<i>Plantaginaceae</i>	D	Overblijvend
20	Veldbeemdgras	<i>Poa pratensis</i> L.	9.8	<i>Poaceae</i>	M	Overblijvend

<sup>3</sup> Procentueel aantal gemeenten waar de soort voorkomt ten opzichte van een totaal van 163 gemeenten waarin de onkruidsoorten bepaald zijn.

## 2.1.4. Preventieve maatregelen

Het is mogelijk om veronkruiding op verhardingen te voorkomen door gunstige groeiomstandigheden te vermijden. Verhardingen zullen immers voornamelijk veronkruiden wanneer voldoende licht, voedingselementen, plantopneembaar water en ruimte (verankeringsplaatsen) beschikbaar zijn (Kempenaar *et al.*, 2006). Preventieve maatregelen kunnen genomen worden bij het ontwerp van verhardingen, bij aanpassingen aan bestaande inrichtingen evenals door het schoonhouden van verhardingen (De Cauwer & Bulcke, 2011).

### 2.1.4.1. *Ontwerp en uitvoering*

Bij aanleg van of aanpassing aan verhardingen moet men erop toezien dat gunstige groeiomstandigheden voor onkruiden zoveel mogelijk vermeden worden. Deze groeiomstandigheden worden beïnvloed door de omgevingsfactoren (zie deel 2.1.3.1.) en technische karakteristieken van de (halfopen) verhardingen. De voornaamste aandachtspunten met betrekking tot een onkruidwerend ontwerp zijn :

#### **Straatsteensoort**

De straatsteensoort bepaalt in sterke mate de gevoeligheid van veronkruiding van verhardingen. Enerzijds bepaalt de straatsteensoort de voegbreedte en het totaal voegpercentage van een verhardingsoppervlak. Zo vertonen conventionele betonklinkers een smallere voegbreedte dan kasseistenen (zie Figuur 1) (Boonen *et al.*, 2013). Het effect van de voegbreedte en het voegpercentage wordt verderop beschreven.

Anderzijds heeft de materiaalsoort (bv. beton of klei) ook een effect op de onkruidgroei. Zo zorgen, bij een gelijke voegbreedte, kleiklinkers als bestratingstype voor een groter onkruidbedekkingspercentage dan de conventionele en poreuze betonstraatstenen en zijn overblijvende soorten relatief belangrijker op kleiklinkers dan op poreuze betonstraatstenen. Op poreuze betonstraatstenen is er een hoger aandeel mossen, waarschijnlijk door de hoge porositeit van het oppervlak (Fagot *et al.*, 2011).



**Figuur 1: Kasseistenen met brede voegen naast betonblokken met smalle voegen.**



## Voegvulling

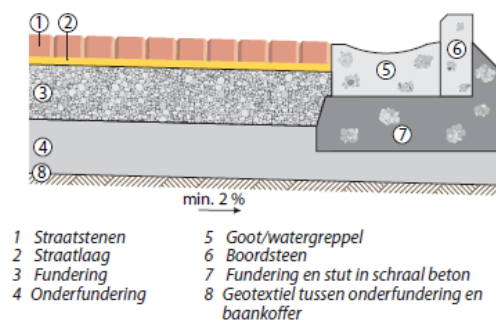
Om voegen in verhardingen op te vullen wordt gebruik gemaakt van voegvullingen. Drie categorieën worden onderscheiden: klassieke gebonden materialen, klassieke ongebonden materialen en innovatieve materialen.

Klassieke gebonden voegvullingen (bv. voegmortel) zijn meestal waterondoorlaatbaar en vertonen geen vermenging met organisch materiaal. Indien er organisch materiaal aanwezig is zal deze op de voegvulling liggen of in barsten in de voegen van verhardingen. Hierdoor zijn ze minder vatbaar voor veronkruiding dan de klassieke ongebonden voegvullingen.

Klassieke ongebonden fijnkorrelige (korreldiameter <2 mm) voegvullingen (bv. wit zand, zeezand of gebroken kalksteen) zijn intrinsiek weinig onkruidwerend in vergelijking met klassieke ongebonden grofkorrelige voegvullingen (bv. porfier (2/6.3)). Hierdoor zullen de klassieke ongebonden voegvullingen, in het bijzonder de fijnkorrelige, bij geringe organische vervuiling (5 % organisch materiaal (OM)) sterk veronkruiden<sup>4</sup> (Boonen *et al.*, 2013). Daarnaast bestaan talrijke innovatieve onkruidwerende voegvullingen (bv. met zout verrijkt zand, polymeergebonden zand, dispersie, organische lijmen,...). Dit zijn voegvullingen die specifiek ontwikkeld zijn om onkruidgroei te voorkomen. Hierbij berust de onkruidremming op de chemische samenstelling (pH, zoutgehalte, mineralenonevenwicht) en/of technische kenmerken (korrelgrootte, met name zeer laag gehalte aan korrels <50 µm en bijgevolg laag gehalte aan plantopneembaar water) en/of de water- en luchtdoorlatendheid. Door de onkruidremmende eigenschappen van deze voegvullingen vertonen ze zelfs in erg vervuilde toestand (bij hoge gehalten aan organische materiaal) amper onkruidgroei (Riemens *et al.*, 2006; Beeldens & Boonen, 2011; Boonen *et al.*, 2013).

## Dimensionering

Een verharding is opgebouwd uit verschillende lagen (zie Figuur 2), deze moeten juist gedimensioneerd worden in functie van de te verwachten verkeersbelasting (meestal dikkere lagen bij zwaardere belasting). Bij een slechte dimensionering ontstaan er immers verzakkingen, barsten van straatstenen, scheuren in het wegdek,... met onkruidgroei als gevolg. In de praktijk wordt daarvoor gebruik gemaakt van standaardstructuren van verhardingen, waarbij wordt aangegeven welke opbouw er nodig is in functie van de verwachte verkeersbelasting (OCW, 2009).



Figuur 2. Opbouw verharding (OCW, 2009).

<sup>4</sup> In voegen van oudere verhardingen komt gemiddeld 10 %OM voor (Boonen *et al.*, 2012)

### Voegbreedte en –percentage

Er dient gestreefd te worden naar zo weinig mogelijk voegoppervlakte. Indien voegen noodzakelijk zijn moeten ze zo smal mogelijk te zijn. De voegbreedte bepaalt immers in belangrijke mate de beschikbare hoeveelheid voedingsbodem, ruimte en water (Kempenaar *et al.*, 2006). Uit onderzoek van Fagot *et al.* (2011) blijkt dat smalle voegen (0-2 mm) zorgen voor een lager aantal onkruidsoorten en een betere beeldscore in vergelijking met middelmatig (2-5 mm) en brede voegen (>5 mm).

Op plaatsen waar een uitzicht van een verharding met voegen gewenst is, maar het risico voor veronkruiding groot is, kan een asfalt- of betonprint gebruikt worden. Bijvoorbeeld bij verkeersgeleiders met weinig betreding en moeilijke bereikbaarheid (zie Figuur 3) (Riemens *et al.*, 2006).

### Obstakels, oneffenheden en verzakkingen

Veel onkruid ontwikkelt zich in de buurt van obstakels, in oneffenheden, bij goten en kantstenen (zie Figuur 4) (Beeldens & Boonen, 2011). Oneffenheden, verzakkingen,... dienen dan ook te allen tijde vermeden te worden. Deze zorgen niet alleen voor opstapeling van water en organisch materiaal, maar zijn vaak moeilijk bereikbaar voor mechanische onkruidbestrijdingsmachines. Onkruidgroei kan voorkomen of beperkt worden door te zorgen voor een goede aansluiting nabij obstakels (bv. verlichtingspalen, verkeersborden, ...), door gebruik te maken van passtukken of voegmortels. Onkruidgroei in goten en nabij kantstenen kan beperkt worden door het voegpercentage te verminderen (o.a. gebruik van grote elementen) en door windstille plaatsen te voorkomen (o.a. door het gebruik van afgeronde kantstenen). Ook is het aangewezen om het aantal obstakels te verminderen (bv. door meerdere borden aan één paal te hangen) (DOB, 2008) of om obstakels naar de aanliggende groenzones te verplaatsen. (De Cauwer & Bulcke, 2011).



**Figuur 3.** Verkeersgeleider in Pressplate® printbeton (Riemens *et al.*, 2006)



**Figuur 4.** Onkruidgroei nabij een verlichtingspaal en in/naast een goot van kasseistenen.

### Inplanting

Bij de inplanting van nieuwe verhardingen moet getracht worden om in de directe omgeving waterpartijen en bronnen van organische vervuiling (o.a. bomen en groenzones) te vermijden. Bovendien dient er een duidelijk afscheiding te zijn tussen de verhardingen en groenzones, indien deze toch aanwezig zijn. Planten uit groenzones (o.a. wegberm en gazon) kunnen verhardingen overgroeien of

ingroeien en zo de functionaliteit en structuur van de verharding aantasten. Bomenrijen te dicht bij verhardingen zijn daarnaast ook ongewenst doordat de wortels de verharding met der tijd omhoog kunnen duwen en zo verzakkingen, plaatsen waar organisch materiaal blijft liggen, doen ontstaan. Om natte plekken te vermijden is het gunstiger de verhardingen in zonnige zones aan te leggen, vermits de zon een drogend effect heeft (Beeldens & Boonen, 2011; AMINAL, 2002).

#### **Oppervlakte in functie van gebruiksintensiteit**

Een hoge gebruiksintensiteit zorgt voor een betere beeldscore, minder aantal onkruidsoorten en een lagere onkruiddruk van overblijvende soorten (Fagot *et al.*, 2011). Daarom is het van belang bij nieuw ontwerp of omvorming van bestaande verhardingen rekening te houden met de verwachte gebruiksintensiteit. Bij een lage gebruiksintensiteit dienen smallere (voetpaden, fietspaden, rijbanen) of kleinere (parkings) verhardingen aangelegd te worden dan bij frequent gebruikte verhardingen, zo zal er toch een voldoende hoge gebruiksintensiteit zijn om onkruidgroei te vermijden (AMINAL, 2002).

Een perfect onkruidwerend ontwerp is echter niet steeds mogelijk gezien ook rekening moet gehouden worden met talrijke factoren zoals verkeersbelasting (voetgangers, auto's), functie (voetpad, rijbaan, verkeerseiland), gebruiksintensiteit, opbreekbaarheid of waterdoorlaatbaarheid (Riemens *et al.*, 2006).

#### **2.1.4.2. Preventief veegbeheer**

Naast de technische maatregelen om onkruiden op verhardingen te voorkomen is het ook belangrijk om de verhardingen proper te houden. Door de verharding regelmatig te vegen met een veegborstel, cilindrische borstel bestaande uit harde polypropyleen haren/bundels, en het veegsel te verwijderen, voorkomt men de opbouw van een gunstige voedingsbodem (voldoende nutriënten en water), waardoor onkruiden minder kans krijgen zich te vestigen. Met een veeg(zuig)machine kan het veegsel in dezelfde werkgang afgezogen worden (zie Figuur 5). Volgens Kempenaar *et al.* (2009) remt intensief vegen de onkruidgroei voornamelijk door bovengrondse beschadiging van de aanwezige onkruiden. Bij 12 veegbeurten per groeiseizoen (tweewekelijks) was er amper aanvullende curatieve onkruidbestrijding nodig om tot een onkruidbedekking van minder dan twee procent te komen.



**Figuur 5. Veegzuigmachine (Dulevo, 2012).**

## 2.1.5. Curatieve maatregelen

Het bestrijden van aanwezige onkruiden gebeurt via curatieve methoden. De curatieve methoden kunnen volgens hun werkingswijze ingedeeld worden in chemische, mechanische en thermische bestrijdingstechnieken.

### 2.1.5.1. *Chemische onkruidbestrijding*

Omtrent de toelating van chemische (onkruid)bestrijding zijn sinds 2001 verschillende decreten en besluiten genomen door de Vlaamse Gemeenschap. Volgens het decreet van 21 december 2001, omtrent vermindering van het gebruik van bestrijdingsmiddelen door openbare diensten in het Vlaamse Gewest (ook wel het pesticidendecreet genoemd), is chemische (onkruid)bestrijding op openbare verhardingen in principe verboden vanaf 1 januari 2004. Openbare diensten kunnen echter een afwijking vragen op het verbod via een voorgesteld reductieprogramma van het gebruik van bestrijdingsmiddelen (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2002). Het reductieprogramma is een stappenplan dat bestaat uit een beleidsoptie, waarin de actieprogramma's en uitvoeringstermijnen vastgelegd worden, en drie actieprogramma's, waarin de doelstelling geformuleerd worden en de acties uitgewerkt worden. Het reductieprogramma moet op 1 januari 2015 uitgevoerd zijn (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2004). In extreme gevallen<sup>5</sup> kan na 2015 nog afgeweken worden van het verbod op gebruik van bestrijdingsmiddelen.

Tijdens de periode van het reductieprogramma kunnen slecht een beperkt aantal gedoogde producten gebruikt worden. Gedoogde producten zijn chemische bestrijdingsmiddelen die na risico-evaluatie een aanvaardbaar risicoprofiel vertonen voor de mens en het milieu. Om de impact en het risico, van bestrijdingsmiddelen te berekenen wordt gebruik gemaakt van de POCER-indicator (Pesticide Occupational and Environmental Risk). Deze indicator geeft een goed overzicht van de neveneffecten van pesticiden (zie bijlage 1). Hoe hoger de POCER-score, hoe groter het risico (Vercruyse & Steurbaut, 2002; Claeys *et al.*, 2005; Claeys *et al.*, 2007). Meer informatie (bijvoorbeeld toegestane dosis) over gedoogde gewasbeschermingsmiddelen is terug te vinden op <http://www.fytoweb.fgov.be/>.

Voor de locaties, in het Vlaams gewest, waar er structurele aanpassingen nodig zijn alvorens een nulgebruik kan toegepast worden is vanaf 1 juli 2009 de Pesticidentoets verplicht. Onder de pesticidentoets wordt "het toetsen van de ontwerpplannen voor de aanleg of heraanleg van groenzones of verhardingen met het oog op onkruidpreventie en een efficiëntere bestrijding met niet-chemische bestrijdingsmethoden na de aanleg of heraanleg" verstaan. De Pesticidentoets bepaalt m.a.w. of het ontwerp onkruidvrij kan blijven zonder gebruik van pesticiden. De Vlaamse milieumaatschappij heeft ter ondersteuning van de openbare besturen een leidraad bij de Pesticidentoets opgesteld waarin

---

<sup>5</sup> Krachtens artikel 3 van het pesticidendecreet kan een openbare dienst tijdelijk van het verbod op middelenverbruik afwijken in geval van:

- Acute en redelijkerwijze niet te voorzien plagen die een gevaar inhouden voor mens en/of milieu.
- In het geval van situaties die een ernstige bedreiging vormen of kunnen vormen voor de veiligheid van de mens en waarvoor tegelijkertijd geen afdoende alternatieve bestrijdingswijzen voorhanden zijn.

aanbevelingen staan over het preventief en middelenvrij ontwerpen en het aanleggen van verhardingen (VMM, 2009).

Sinds 15 maart 2013 is een uitgebreider besluit, nl. “het Besluit van de Vlaamse Regering houdende nadere regels inzake duurzaam gebruik van pesticiden in het Vlaamse Gewest voor niet-land- en tuinbouwactiviteiten en de opmaak van het Vlaams Actieplan Duurzaam Pesticidengebruik”, van kracht. Hierin wordt het toepassingsgebied van het nulgebruik, volgens het decreet van 21 december 2001 uitgebreid<sup>6</sup> naar o.a. terreinen bij kinderopvang, scholen en instellingen voor kleuter-, basisonderwijs en secundair onderwijs. Daarnaast wordt een minimumgebruik van pesticiden opgelegd op o.a. alle verharde terreinen die 200 m<sup>2</sup> of groter zijn en alle terreinen die toegankelijk zijn voor het brede publiek of voor kwetsbare groepen (zoals parken, tuinen, begraafplaatsen, sport- en recreatiedomeinen) die beheerd worden in het kader van een openbare dienst of in het kader van een commerciële activiteit (Vlaamse Overheid, 2013).

In Nederland is er geen verplicht nulgebruik en kan chemische onkruidbestrijding op verhardingen toegepast worden indien voldaan wordt aan het systeem Duurzaam OnkruidBeheer, de DOB-methode. Binnen de DOB-methode wordt gebruik gemaakt van chemische, thermische of mechanische bestrijdingsmethoden. Bij gebruik van chemische bestrijdingsmiddelen dienen extra regels opgevolgd te worden om afspoeling naar het oppervlaktewater te vermijden. De praktische richtlijnen waarmee beheerders en uitvoerders van onkruidbestrijding rekening moeten houden zijn beschreven in drie shortlists (Kempenaar & van Dijk, 2006). Deze shortlists en een uitgebreidere uitleg van de DOB-methode zijn terug te vinden op: <http://www.wageningenur.nl/nl/Onderzoek-Resultaten/Projecten/DOB-verhardingen/DOB-en-DOB-2.0-richtlijnen.htm>.

#### 2.1.5.2. *Mechanische onkruidbestrijding*

Mechanische technieken snijden of rukken de bovengrondse plantendelen af. Het elimineren van de onkruiden berust op het uitputten van de planten (Delarue & Willem, 2006). De voornaamste mechanische technieken op halfopen verhardingen zijn borstelen, maaien, waterstraalsnijden en betreding en berijding.

Bij het **borstelen** met afzuiging van borstelafval wordt naast de bovengrondse plantendelen ook organisch afval, dat een voedingsbodem voor onkruiden vormt, verwijderd. Er wordt voornamelijk gebruik gemaakt van borstels vervaardigd uit staal (Boonen *et al.*, 2013; Delarue & Willem, 2006). De borstels zijn hetzij verticaal draaiend hetzij horizontaal draaiend. Verticaal draaiende borstels zijn ideaal om goten of randen die naast groenzones liggen te borstelen (Delarue & Willem, 2006) maar ze veroorzaken grotere schade aan de verharding dan horizontaal draaiende borstels (Rask & Kristoffersen, 2007). Uitvoeringen met horizontaal draaiende borstels, worden het meest toegepast. Deze zijn vaak voorzien van een afzuigstelsysteem (borstel-zuigcombinatie) om het geborstelde afval te verwijderen. Zoniet

---

<sup>6</sup> Volgens het besluit van 15 maart 2013, Hoofdstuk 3, artikel 5 t.e.m. 7 kan nog een uitzondering op het verbod van pesticidengebruik aangevraagd worden en tegen beslissingen van de Vlaamse Milieumaatschappij, inzake al dan niet toelaten van een uitzondering, in beroep gegaan worden.

wordt nog nageveegd met een veeg-zuigmachine. Naast het borstelen van de volledige verharding is er ook de mogelijkheid tot voeg-borstelen. Hierbij worden de voegen met fijne stalen borstels geborsteld. Het voeg-borstelen vertoont een hogere effectiviteit dan het conventioneel borstelen, maar vergt een grote arbeidsintensiteit (Delarue & Willem, 2006). Voeg-borstelen wordt in de praktijk slechts beperkt toegepast.

**Maaïen** is het afsnijden van de planten kort boven de verharding. Er wordt gebruik gemaakt van conventionele maaimachines (bv. mes- of klepelmaaiers) en bosmaaiers. Om de conventionele maaimachines toe te kunnen passen zonder machineschade (bv. breken van messen) dienen de verhardingen echter voldoende vlak te liggen (Vermeulen *et al.*, 2002). Het maaïafval wordt in één (bv. maaï-zuigmachine) of twee (bv. bosmaaier) werkgangen verwijderd. Bosmaaiers worden voorzien van een nylondraad of een mes en worden gebruikt om dicht bij obstakels te maaïen, waar de conventionele maaimachines en borstelmachines onvoldoende bereik hebben. Om schade aan de obstakels te vermijden krijgt een nylondraad de voorkeur. De snelle slijtage van de nylondraad en de hoge arbeidsintensiteit is een nadeel bij het gebruik van bosmaaiers (Vermeulen *et al.*, 2002; Spijker *et al.*, 2002).

**Waterstraalsnijden** is het afsnijden van planten via een fijne, snijdende waterstraal. Water wordt bij hoge druk door een spuitdop gestuurd, waardoor een fijne, coherente, snijdende straal ontstaat. Hierbij zorgt een grotere diameter van de waterstraal voor een lagere benodigde druk<sup>7</sup> om een goede snijcapaciteit te hebben en is de benodigde druk hoger bij een toenemende afstand tussen de spuitdop en het onkruid. In de praktijk kunnen onkruiden bij een druk van 350 bar en een spuitdopdiameter van 1.4 mm doorgesneden worden. Op verhardingen is de spuithoek van de waterstraal ook van belang om het uitspuiten van de voegen te vermijden. Voor een verharding met betonklinkers dient de spuithoek kleiner dan 10° te zijn. De voordelen van waterstraalsnijden zijn de richtbaarheid van de waterstralen op moeilijk bereikbare plaatsen, de mogelijkheid tot een breed werkgebied via verschillende spuitdoppen en een verminderde schade aan de verhardingen. Als nadelen zijn het hoge waterverbruik (bv. 1620 l/u bij 500 bar), het hoge benodigde motorvermogen (met hoge geluidsproductie en brandstofverbruik als gevolg), de noodzaak tot precieze richting naar de onkruiden (bij te hoog richten worden de planten omver geblazen en bij te laag richten spat de waterstraal uiteen op de verharding) en de noodzaak tot een volgbewerking om het afgesneden onkruid te verwijderen (opzuigen direct na afsnijden wordt bovendien bemoeilijkt doordat het onkruid nat is en de neiging heeft om aan de verharding te kleven) (Vermeulen *et al.*, 2002).

**Betreding en berijding** kunnen ook aanzien worden als curatieve maatregelen tegen onkruidgroei. Een hoge gebruiksintensiteit zorgt immers voor een kleiner aantal onkruidsoorten, een lagere onkruiddruk van overblijvende soorten en dus voor een betere beeldscore (Fagot *et al.*, 2011).

---

<sup>7</sup> Om een peen van 50 mm door te snijden was bij een uitstroomopening van 1.35 mm 186 bar en bij een uitstroomopening van 0.57 mm 536 bar nodig.

### 2.1.5.3. *Thermische onkruidbestrijding*

Net als bij de mechanische onkruidbestrijding berust het elimineren van de onkruiden via de thermische technieken zich op het uitputten van de planten door het bestrijden van het bovengrondse plantenweefsel. Bij thermische onkruidbestrijding worden namelijk de bovengrondse plantendelen verhit tot boven de letale weefseltemperatuur<sup>8</sup>. Subletale effecten, met groeiremming als gevolg, kunnen ook optreden indien de weefsels onvoldoende verhit worden en de letale weefseltemperatuur niet bereikt wordt. Verhitting van weefsels zorgt enerzijds voor een denaturatie en aggregatie van membraanewitten, met een verhoging van de celpermeabiliteit en sterfte als gevolg (Ascard, 1995). Anderzijds is er cuticulaire afbraak, waardoor de plant zal uitdrogen en niet meer kan voldoen in zijn vitale functies (bv. fotosynthese,...) (Collins, 1999). Volgens Sirvydas (2006) en De Cauwer & Bulcke (2011) is een weefseltemperatuur van minimum 58°C noodzakelijk voor (het bekomen van) een letaal effect. De verhitting van de weefsels gebeurt direct, gebruikmakend van een bewegend warmtedragend medium (o.a. hete vlam, hete lucht en heet water), of indirect, gebruikmakend van andere technieken om energie over te dragen (o.a. straling en elektrocutie) (De Cauwer, 2011).

De warmteoverdracht tussen verschillende lichamen kan convectief, conductief, via condensatie of via straling (radiatief) gebeuren. Bij convectie wordt warmte vervoerd in een bewegend warmtedragend fluidum (bv. hete luchtstroming) overgedragen op een kouder (stilstaand) oppervlak. Het warmteoverdrachtrendement stijgt bij toenemende turbulentie van het medium. Conductie of geleiding is warmteoverdracht door een temperatuursverschil in een object (bv. tussen plantenweefsels) of tussen twee stilstaande contactmakende media (bv. heetwaterfilm bovenop een blad). De warmte stroomt van een warm medium naar een koud medium. Bij condensatie gebeurt de warmtetransport via een gasvormig medium (bv. waterdamp) dat zijn warmte overdraagt door te condenseren, waarbij de latente warmte wordt vrijgegeven, op het op te warmen lichaam. Bij straling gebeurt de warmteoverdracht via hoog-energetische golven die uitgestraald worden door een warm lichaam en geabsorbeerd worden door een koud lichaam.

De warmtestroom<sup>9</sup>, van een warmtebron tot een plant, hangt af van de bladoppervlakte, het temperatuursverschil tussen de warmtebron en de plant en de warmteoverdrachtscoëfficiënt (bij convectie) of warmtegeleidingscoëfficiënt (bij conductie) (De Cauwer & Bulcke, 2011).

De voornaamste toegepaste thermische technieken op verhardingen zijn branden, hete lucht, infrarode straling, heet water en stoom (zie Tabel 4) (Collins, 1999; Rask & Kristoffersen, 2007).

---

<sup>8</sup> Temperatuur waarboven de weefsels afgedood worden

<sup>9</sup> Stroom van energie onder vorm van warmte die van hoge naar lage temperatuur stroomt.

**Tabel 4. Overzicht van de verschillende thermische technieken met hun wijze van warmteoverdracht en blootstellingstemperatuur (De Cauwer & Bulcke, 2011).**

<b>techniek</b>	<b>warmteoverdracht</b>	<b>blootstellingstemperatuur (°C)</b>
Branden	Convectief	600 – 700
Hete lucht	Convectief	90 – 130
Infrarode straling	Straling	n.v.t.
Heet water*	Conductief	78 – 100
Stoom	Condensatie	100 – 105

\*Detailbespreking zie verder in 2.2

Het is niet aanbevolen de thermische technieken in te zetten bij nat weer, lage temperaturen, een hoge onkruidbedekkingsgraad van de verharding en een hoge, dichte vegetatie. In dergelijke gevallen is de techniek minder doeltreffend en zijn hoge energiedosissen nodig om de onkruidvegetatie te doden (zie 2.2.2.2.). Daarnaast is het niet aanbevolen om convectieve technieken in te zetten in een dorre vegetatie en in zones van brand- en explosiegevaar, omwille van het gebruik van een zeer warm warmtedragend medium. Het is ook niet aanbevolen de convectieve technieken in te zetten in een behaarde vegetatie, omwille van een slechtere warmteoverdracht door de aanwezigheid van een laminaire grenslaag<sup>10</sup>.

## 2.1.6. Geïntegreerde en duurzame onkruidbeheersing, een noodzaak

### 2.1.6.1. Principe

Het is belangrijk om de verschillende bestrijdingstechnieken zo efficiënt mogelijk en tegen een zo laag mogelijke kostprijs toe te passen. Dit principe wordt toegepast in het systeem van een duurzame en geïntegreerde onkruidbeheersing (Kempenaar & van Dijk, 2006; De Cauwer, 2011; Boonen *et al.*, 2013). Bij een geïntegreerd bestrijdingssysteem worden de bestrijdingsmethoden (liefst met een verschillende werkingwijze) op elkaar afgestemd. Deze oordeelkundig opgestelde bestrijdingssystemen zijn bovendien ook duurzaam vermits ze onkruidbestrijding beogen met zo weinig mogelijk kosten (vnl. afhankelijk van de vereiste bestrijdingsfrequentie<sup>11</sup>), nadelige milieu-effecten (zie 2.1.6.2.) en schade aan de functionaliteit van de verharding.

Factoren die bepalend zijn voor de benodigde bestrijdingsfrequentie zijn de vereiste bestrijdingsdrempel, de ingezette energiedosis, de initiële veronkruiding, aard van de flora, omgevingsfactoren (zie 2.2.3.2) en het bestrijdingssysteem. Bestrijdingssystemen die technieken met verschillende werkingwijze afwisselen verdienen om duurzaamheidsredenen de voorkeur. Bij eenzijdig toepassen van een techniek zal de bestrijdingsfrequentie immers stijgen om eenzelfde drempelwaarde te kunnen bereiken (Boonen *et al.*, 2013). Deze stijging wordt veroorzaakt door het optreden van floraverschuivingen: bij elke beurt nemen die soorten toe die minder gevoelig zijn voor de toegepaste

<sup>10</sup> Een laminaire grenslaag is een stilstaande luchtlaag, bv. ontstaan door opstaande beharing, waarin de warmteoverdracht minder vlot doorgaat. Turbulentie kan de vorming van een laminaire grenslaag afremmen hetgeen bevorderlijk is voor de warmteoverdracht.

<sup>11</sup> Aantal beurten vereist per groeiseizoen om veronkruiding onder een voor de beheerder aanvaardbare bestrijdingsdrempel te houden



bestrijdingstechniek, waardoor de bestrijdingsfrequentie op termijn nog zal toenemen. Zo neemt de dominantie van paardenbloem (*Taraxacum officinale* L.) toe bij eenzijdig toepassen van heet water (Fagot *et al.*, 2011). De andere factoren worden in 2.2.3.2. besproken.

### 2.1.6.2. Milieu-impact

Om de milieu-impact (van een bepaalde handeling) te bepalen worden levenscyclusanalyses (LCA's) uitgevoerd. Een LCA kwantificeert de potentiële invloed op mens en milieu van de onderzochte toepassing. Hierbij worden alle processen en producten van wieg tot graf geanalyseerd op verschillende milieueffecten (o.a. broeikas effect, ecotoxiciteit en vermisting). Er wordt dus niet alleen naar het effect van de activiteit zelf gekeken, maar ook naar de productie en afvalverwerking die nodig is om de activiteit uit te kunnen voeren. Als resultaat wordt een LCA-score verkregen. Op basis van deze score kan bepaald worden welke milieueffecten het meest bijdragen tot een negatieve milieu-impact en waarop ingespeeld kan worden om de milieu-impact te verbeteren (Saft & Staats, 2002; Boonen *et al.*, 2013).

De LCA-score kan relatief uitgedrukt worden ten opzichte van alle activiteit in een bepaald gebied (land, stad,...) of kan bv. uitgedrukt worden in ReCiPe-punten<sup>12</sup>. ReCiPe verwijst hierbij enerzijds naar de methode, recept (Engels: Recipe), dat gebruikt wordt om de LCA-score te berekenen. Anderzijds bevat het ook de initialen van de ontwerpers van de methode (RIVM and Radboud University, CML en PRé) (Saft & Staats, 2002; Goedkoop *et al.*, 2013).

Chemische en niet-chemische technieken dragen in verschillende mate bij tot de milieuthema's betrokken bij de berekening van de totale milieu-impact.

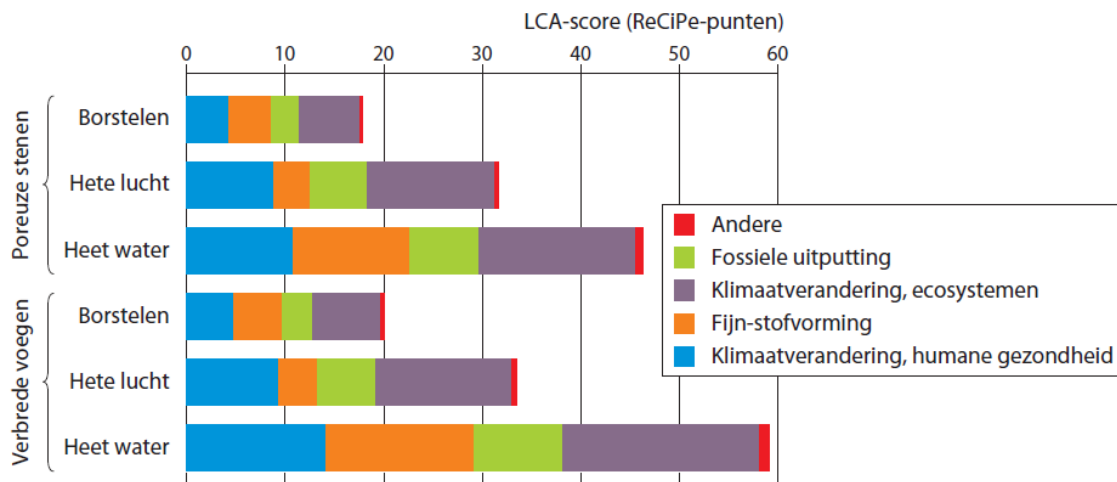
- **Chemische** onkruidbestrijdingstechnieken zorgen, door het gebruik en de afspoeling van herbiciden (meestal glyfosaat), voor het grootste negatieve effect inzake ecotoxiciteit van aquatische milieus en sedimenten. Op verhardingen is er immers weinig substraat waar glyfosaat, met een hoge adsorptiecapaciteit aan bodemdeeltjes, zich aan kan binden (Giesy *et al.*, 2000). Indien er extra maatregelen getroffen worden om afspoeling te beperken, zoals wanneer de DOB-methodiek (zie eerder 2.1.5.1) gebruikt wordt, vermindert de negatieve milieu-impact drastisch (Saft & Staats, 2002; Saft, 2005; Jonkers, 2012).
- **Niet-chemische** onkruidbestrijdingstechnieken veroorzaken voornamelijk negatieve effecten inzake klimaatverandering (met negatieve gevolgen voor de menselijke gezondheid en ecosystemen), fijn stofvorming en fossiele uitputting. Deze worden veroorzaakt door een hoog brandstofverbruik (diesel, lpg) en bijhorende milieu-impact van het produceren van de brandstoffen. Branden en heet water zorgen hierbij voor de grootste bijdrages (Saft & Staats, 2002; Saft, 2005; Boonen *et al.*, 2013; Jonkers, 2012). Bij borstelen is er nog discussie over het milieu-effect. Volgens Saft (2005) zorgt de slijtage aan de verharding voor een significante bijdrage aan de LCA-score (voornamelijk aan fossiele uitputting), volgens Boonen *et al.* (2013) is het milieu-effect van de slijtage aan verhardingen echter te verwaarlozen in de totale LCA-score.

---

<sup>12</sup> De totale score in ReCiPe-punten is een gewogen gemiddelde van schade aan de menselijke gezondheid (verlies in gezondheidsjaren), ecosysteemschade (biodiversiteitsverlies) en uitputting van grondstoffen.

Om de milieu-impact te verbeteren dient er bij chemische technieken gefocust te worden op het beperken van de afspoeling van bestrijdingsmiddelen. Bij niet-chemische methoden dient er gefocust te worden op een vermindering van het energieverbruik (nodig voor voortstuwen van de werktuigdrager en voor thermische en mechanische behandeling van het onkruid).

De totale milieu-impact van bestrijdingstechnieken kan vergeleken worden per behandelingsbeurt of per groeiseizoen. De verhardingssoort<sup>13</sup> heeft enkel een significant effect op de milieu-impact per behandelingsbeurt van de sensor-gestuurde heetwatertechniek. Bij de sensor-gestuurde heetwatertechniek worden onkruiden gedetecteerd a.d.h.v. onkruiddetectiesensoren (o.b.v. stralingsreflectie of chlorofylfluorescentie) om deze selectief met heet water te kunnen behandelen (Vermeulen *et al.*, 2002). Hierbij vertoont de sensor-gestuurde heetwatertechniek een grotere milieu-impact per behandelingsbeurt dan hete lucht en borstelen (zie Figuur 6). De grotere milieu-impact van de heetwatertechniek wordt veroorzaakt door een relatief (t.o.v. de andere technieken) hoog diesilverbruik en de relatief (t.o.v. lpg) hoge emissiewaarden aan fijn stof bij diesilverbranding (Boonen *et al.*, 2013). Het analyseren van de milieu-impact per bestrijdingsbeurt laat toe om de bestrijdingstechniek te optimaliseren (zie 2.2.3).



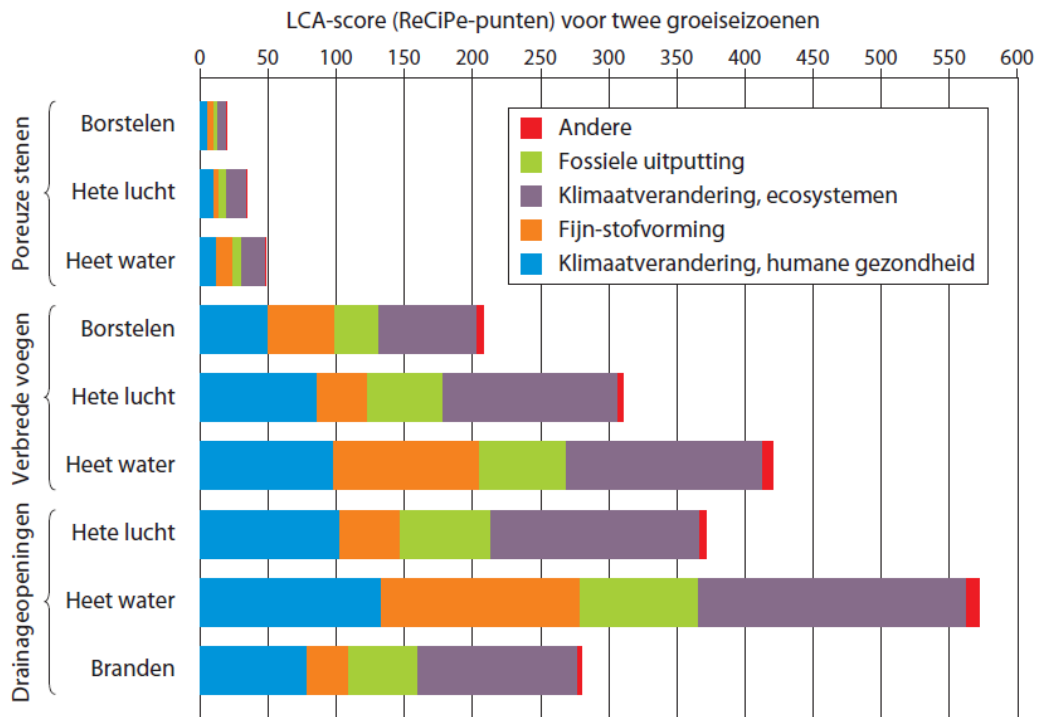
**Figuur 6. Milieu-impact per behandelingsbeurt toegepast op poreuze betonstraatstenen (6 % voegpercentage) en op betonstraatstenen met verbrede voegen (15 % voegpercentage) van de verschillende bestrijdingstechnieken (sensor-gestuurde heetwatertechniek) (Boonen *et al.*, 2013).**

Factoren die een invloed uitoefenen op de milieu-impact per groeiseizoen, zijn het gehandhaafde beeldscorecriterium, de verhardingssoort, de onkruidbestrijdingsmachine (het ene toestel is het andere niet), en de weersomstandigheden. Een strenger beeldscorecriterium zal op korte termijn (eerste seizoen) voor een stijging van de benodigde bestrijdingsfrequentie en dus milieu-impact zorgen. Op lange termijn (verschillende seizoenen) is er geen verschil meer in benodigde bestrijdingsfrequentie en zal de milieu-impact dus niet hoger zijn (zie ook 2.2.3.2). De milieu-impact van onkruidbestrijding op

<sup>13</sup> Met verhardingssoort wordt de combinatie van straatsteensoort en voegpercentage bedoeld.

verhardingen wordt, per twee groeiseizoenen, in belangrijkere mate beïnvloed door de verhardingssoort dan door het gekozen bestrijdingsscenario<sup>14</sup> (zie Figuur 7) (De Cauwer, 2013b). Dit herbevestigt het belang van een goede onkruidpreventie via juist ontwerp en aanleg. De toegepaste bestrijdingssmachine, met meer specifiek de gebruikte werktuigdrager, kan door onderlinge technologische verschillen (o.a. verbruik) sterke verschillen het aandeel in het milieu-effect, volgens Boonen *et al.* (2013) kan dit variëren tussen 10 en 70 %, afhankelijk van het toegepaste bestrijdingsscenario's. Bij gunstige weersomstandigheden voor onkruidgroei zal de benodigde bestrijdingsfrequentie al snel met 0.5 behandeling per seizoen stijgen (zie ook 2.2.3.2).

Voorzichtigheid is geboden bij het vergelijken van LCA-studies. De uitkomst van LCA-studies is immers zeer variabel. Ze wordt o.a. beïnvloed door gebruikte inputparameters (o.a. bestrijdingsfrequentie, verbruik, veegafval) en de gebruikte berekeningsmethode (bv. ReCiPe,...) (De Cauwer, 2013b).



**Figuur 7. Milieu-impact per twee groeiseizoenen op poreuze betonstraatstenen (6 % voegpercentage), betonstraatstenen met verbrede voegen (15 % voegpercentage) en betonstraatstenen met drainageopeningen (12.5 % voegpercentage) van de verschillende eenzijdig ingezette bestrijdingstechnieken (sensorgestuurde heetwatertechniek) (Boonen *et al.*, 2013).**

<sup>14</sup> Tot de bestrijdingsscenario's hoort het eenzijdig toepassen van hete lucht, heet water, branden, borstelen en het altemnerend borstelen/hete lucht.

## 2.2. Gevalstudie: heet water

### 2.2.1. Warmteoverdracht

#### Theoretische principes en procesbeschrijving

Bij de heetwatertechniek wordt water gebruikt als energiedrager. Het water wordt opgewarmd tot 98°C en wordt via uitstroomopeningen in contact gebracht met bovengrondse plantenweefsels. De warmte vevat in de heetwaterfilm wordt conductief overgedragen op het plantoppervlak. In de plant wordt de warmte verder conductief getransporteerd naar dieper gelegen weefsellagen en groeipunten. Bovengrondse weefsels en groeipunten worden enkel gedood wanneer ze verhit worden tot boven de letale temperatuur van ongeveer 58°C (zie 2.1.5.3). Dieper gelegen weefsels of groeipunten bereiken deze letale temperatuur vaak niet (De Cauwer & Bulcke, 2011).

De **energiehoeveelheid** nodig om water op te warmen bedraagt:

$$Q = m c \Delta T \quad (\text{Formule 1})$$

Hierbij is  $Q$  (J) de energiehoeveelheid,  $m$  (kg) de op te warmen massa,  $c$  (J/(kg\*K)) de soortelijke warmte van de opgewarmde materie en  $\Delta T$  (K) de temperatuursverhoging van de materie nodig voor het opwarmen (Van der Meeren, 2009). De soortelijke warmte van water bij 22 °C bedraagt 4181 (J/(kg\*K)) (Pieters, 2009b). Deze formule kan ook gebruikt worden om de theoretische hoeveelheid energie nodig om de plant te doden te berekenen. Hierbij is  $m$  dan de verse bovengrondse biomassa van de plant,  $c$  de soortelijke warmte van het plantmateriaal en  $\Delta T$  het temperatuursverschil tussen de letale (ongeveer 58°C) en actuele planttemperatuur (Hansson & Mattsson, 2003). De soortelijke warmte van plantmateriaal is sterk afhankelijk van het vochtgehalte. Hoe hoger het vochtgehalte, hoe dichter de soortelijke warmte bij dat van water zal liggen, bij een vochtgehalte van 85 % (drogestofgehalte = 15 %) zal de soortelijke warmte van plantmateriaal iets hoger dan 3600 (kJ/(kg\*K)) zijn.

De **conductieve warmtestroom** doorheen een vlakke plaat (vergelijkbaar met een blad) wordt volgens de wet van Fourier voor ééndimensionale systemen zonder inwendige warmteproductie (formule 2) berekend als:

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Formule 2})$$

Hierbij is  $\phi$  (W=J/s) de warmtestroom,  $Q$  (J) de energiehoeveelheid,  $\Delta t$  (s) de afgelegde tijd om door de plaat te gaan,  $\lambda$  (W/(m\*K)) de warmtegeleidingscoëfficiënt,  $A$  (m<sup>2</sup>) de oppervlakte van de plaat dwars op richting van de energiestroom,  $\Delta T$  (K) de temperatuursgradiënt tussen beide zijden van de plaat en  $\Delta x$  (m) de dikte van de plaat (Pieters, 2009a).

De warmtegeleidingscoëfficiënt is een materiaalconstante die aangeeft hoe snel energie wordt doorgegeven in de materie (Pieters, 2009a). De warmtegeleidingscoëfficiënt van water, bij 100°C en 1 atmosfeer (= 1.01325 bar), bedraagt 0.682 W/(m\*K) (De Cauwer, 2011).

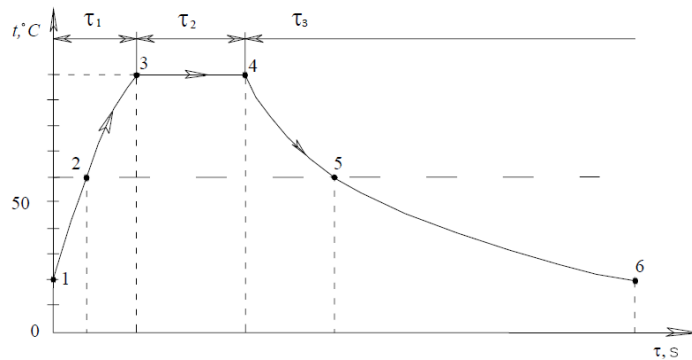
De drijvende kracht achter warmtetransport is de temperatuursgradiënt ( $\Delta T$ ). De warmteoverdracht van de heetwaterfilm naar het plantoppervlak gebeurt snel door een groot temperatuursverschil tussen het heet water en het plantoppervlak ( $\Delta T = \text{ong. } 80^\circ\text{C}$ ). Intern warmtetransport in de plant gebeurt echter veel trager door de beperktere temperatuursgradiënt aanwezig in de plant. Het is dan ook van belang de weefsels voldoende lang te verhitten om ook de dieper gelegen plantenweefsels (bv. groeipunten) voldoende te verhitten en zo te doden (De Cauwer & Bulcke, 2011)

Tijdens het **verhittingproces** doorlopen plantenweefsels drie opeenvolgende fasen (Sirvydas *et al.*, 2006) (Figuur 8): Gedurende de eerste fase ( $\tau_1$ ) is er een sterke temperatuurstijging van het plantoppervlak. Gedurende de tweede fase ( $\tau_2$ ) worden de weefsels verder blootgesteld aan een thermische bron, waarbij het plantoppervlak een (quasi) evenwichtstemperatuur bereikt en dieper gelegen weefsels verder opgewarmd worden tot boven de letale weefseltemperatuur. Gedurende de laatste fase ( $\tau_3$ ) koelen de plantenweefsels terug af door de stopgezette blootstelling aan een thermische bron.

De *eerste fase* ( $\tau_1$ ) is de fase waarin het plantoppervlak wordt opgewarmd tot een temperatuur hoger dan de letale weefseltemperatuur. De duur van deze fase is, naast biologische en omgevingsfactoren, ook sterk afhankelijk van de gebruikte technologie. Indien een gasvormig medium gebruikt wordt om de thermische bestrijding uit te voeren zal de plant nog in staat zijn om te transpireren (koelend effect) en zo opwarming van de weefsels te vertragen. Indien stoom of water gebruikt wordt, zal de omgeving van de plant meer waterverzadigd zijn en zal er minder transpiratie kunnen plaatsvinden. Hierdoor zal de opwarming van de weefsels gedurende de  $\tau_1$ -fase veel sneller plaatsvinden. Sirvydas *et al.* (2006) bekwamen voor gasvormige media een  $\tau_1$  van meer dan 10 seconden, voor stoom was deze  $0.5 \pm 0.15$  s. Dit verschil in opwarmingssnelheid verklaart waarom de vereiste blootstellingsduur lager is bij heet water dan bij stootbranden.

De *tweede fase* ( $\tau_2$ ) definieert de periode van verdere verhitting nodig om de interne weefsels ook (net als het plantoppervlak) tot boven de letale temperaturen op te warmen. Dit proces van inwendig warmtetransport kan niet beïnvloed worden door menselijke ingrepen en is, door het conductief karakter van de warmtestroom, sterk afhankelijk van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de interne weefsels.

De *derde fase* ( $\tau_3$ ) of afkoelingsfase is een natuurlijk proces afhankelijk van de omgevingsfactoren (o.a. omgevingstemperatuur, vochtigheid) (Sirvydas *et al.*, 2006).



**Figuur 8.** Schematische weergave van plantoppervlaktetemperatuur i.f.v. tijd gedurende thermisch bestrijding. Met  $\tau_1$  de tijdsduur van de opwarming van het plantoppervlak,  $\tau_2$  de tijdsduur van de verdere blootstelling aan een thermische bron en  $\tau_3$  tijdsduur van de periode van afkoeling (vanaf 4 stopzetting verhitting). Gedurende periode 1-3 ondergaat het bladoppervlak een snelle temperatuurstijging, daarna (periode 3-4) ontstaat een evenwichtstemperatuur aan het plantoppervlak en worden interne weefsel verder opgewarmd. Binnen de periode begrepen tussen punt 2 en 5 is de weefseltemperatuur- eerst aan het oppervlak (2) en vervolgens dieper gelegen weefsels (3-4)- groter dan de letale temperatuur. Dit schema is gebaseerd op proeven met stoom (100°C) op kaal knopkruid (*Galinsoga parviflora* Cav.) en temperatuursmetingen via thermokoppels aan het plantoppervlak, in de stengel en in de omgeving (Sirvydas *et al.*, 2006) .

### Vereiste watertemperatuur en energiedosis

Om de bovengrondse plantendelen van onkruiden te doden dienen deze tot in de dieper gelegen groeipunten verhit te worden tot letale weefseltemperaturen (58°C, zie 2.1.5.3.). Om dit te bereiken bij de toepassing van de heetwatertechniek dienen de watertemperatuur en energiedosis zorgvuldig gekozen te worden. De energiedosis is de totale hoeveelheid energie (kJ) die per m<sup>2</sup> behandeld oppervlak wordt toegepast en wordt bepaald door de energie-intensiteit (watertemperatuur) en de blootstellingsduur (Boonen *et al.*, 2013). De benodigde blootstellingsduur (Figuur 8:  $\tau_1 + \tau_2$ ) is afhankelijk van de snelheid van het opwarmen van het plantoppervlak en de snelheid van het inwendig warmtetransport (Sirvydas *et al.*, 2006).

In onderzoek toegepaste watertemperaturen<sup>15</sup> zijn 97 tot 125°C door Hansson & Mattsson (2002), 103 tot 120°C door Hansson & Ascard (2002) en 98°C door Boonen *et al.* (2013). Volgens Hansson & Mattsson (2002) zorgt een hogere watertemperatuur (ongeveer 120°C i.p.v. ongeveer 100°C), bij gelijke energiedosis, voor een verhoogde reductie (8 tot 15%) in verse biomassa.

Bij de keuze van de energiedosis dient gestreefd naar een optimale bestrijdingsdosis. Een *optimale bestrijdingsdosis* is een energiedosis die voldoende is om bovengrondse plantendelen voor meer dan 90% te doden via blanchering. *Subletale dosissen* zorgen voor onvoldoende weefseldoding met

<sup>15</sup> Watertemperaturen hoger dan 100°C kunnen verkregen worden door het water onder hogere druk (dan de atmosferische druk van 101.325 kPa) toe te passen op de planten.

hoogstens wat bladrandnecrose<sup>16</sup>, met groeiremming in plaats van doding van bovengrondse plantendelen tot gevolg. *Supraletale dosissen*, waarbij de onkruiden verbranden i.p.v. blancheren, zorgen voor eenzelfde bestrijdingseffect als de optimale dosis, maar door een hogere energie-input wordt een negatievere milieu-impact bekomen (Boonen *et al.*, 2013).

De toe te passen dosis om een effectieve onkruidbestrijding te verkrijgen is afhankelijk van omgevings-, biologische en technologische factoren (zie verder in 2.2.2.2.) en van de gewenste mate van onkruidbestrijding. Zo kan er gestreefd worden om een dosis toe te passen waarbij 90% van de bovengrondse biomassa van de aanwezige onkruiden sterft na de behandeling ( $ED_{90}$ ) of naar een dosis waarbij er een beperkter aandeel bovengrondse biomassa sterft, bv. 60% ( $ED_{60}$ ). De gewenste mate van bestrijding heeft een impact op de eco-efficiëntie (zie verder in 2.2.3.2.). De optimale dosis dient dus gevalspecifiek (onkruidflora, gewenste bestrijdingsschema,...) bepaald te worden.

## 2.2.2. Effectiviteit

### 2.2.2.1. Definitie

De effectiviteit of doeltreffendheid van een onkruidbestrijdingsmethode is de mate waarin het onkruid bestreden wordt. De mate van bestrijding is het procentueel verlies aan bovengrondse biomassa, bedekking of aantal levende planten, relatief uitgedrukt ten opzichte van een onbehandelde controle.

### 2.2.2.2. Invloedsfactoren

De effectiviteit van de heetwatertechniek, wordt beïnvloed door omgevings-, technologische en biologische factoren.

#### **Omgevingsfactoren**

De belangrijkste omgevingsfactoren zijn de neerslag en de luchttemperatuur.

Nat onkruid, na *neerslag*, vereist meer energie dan droog onkruid om eenzelfde bestrijdingseffect te verkrijgen. Immers zowel het bladeigen water als het water aanwezig op het bladoppervlak wordt opgewarmd. Hierdoor is er meer energie nodig om een letale weefseltemperatuur te bereiken. Hansson & Mattsson (2003) vonden voor witte mosterd (*Sinapis alba* L.) in het 4 tot 6-bladstadium dat de neerslag zorgt voor een verhoging van de  $ED_{90}$  met 21 % ( $ED_{90,met\ neerslag} = 711\text{ kJ/m}^2$  en  $ED_{90, zonder\ neerslag} = 587\text{ kJ/m}^2$ , bepaald 7 dagen na behandeling).

De *luchttemperatuur* weerspiegelt de planttemperatuur. In normale omstandigheden zal de planttemperatuur ongeveer gelijk zijn aan de luchttemperatuur (Steppe, 2011). Theoretisch gezien, volgens Formule 1 (zie 2.2.1), is er bij een lagere luchttemperatuur dus een hogere energiedosis nodig om de plant tot de letale planttemperatuur op te warmen. Volgens Hansson & Mattsson (2003) heeft de luchttemperatuur bij lage temperaturen echter geen significant effect op de mate van bestrijding. Zowel

---

<sup>16</sup> Dunnere plantweefsels (bv. bladranden) worden sneller verhit tot boven de letale weefseltemperatuur dan dikkere weefsels (bv. middennerf).

bij een luchttemperatuur van 7 °C als bij 18°C was de ED<sub>90</sub> voor de bestrijding van witte mosterd (*Sinapis alba* L.), verkerend in het 4-bladstadium, met heet water van 104°C vergelijkbaar (ED<sub>90,lage temp</sub> en ED<sub>90,hoge temp</sub> = 465 kJ/m<sup>2</sup>, bepaald 7 dagen na behandeling).

### Technologische factoren

De belangrijkste technologische factoren bij de heetwatertechniek zijn de druppelgrootte, de watertemperatuur en het gebruik van uitvloeiers.

De *druppelgrootte* heeft bij heetwatertechnieken die gebruik maken van spuitdoppen een dubbel effect. Enerzijds zullen grovere druppels minder snel afkoelen dan fijne druppels, waardoor meer energie de plant zal bereiken. Anderzijds zorgen grovere druppels voor een slechtere bedekking van het oppervlak. De toepassing van fijne heetwaterdruppels (diameter 170 µm), op witte mosterd (*Sinapis alba* L.) verkerend in het 4 tot 5-bladstadium resulteerde zowel bij lage (455 kJ/m<sup>2</sup>) als bij hogere energiedosis (755 kJ/m<sup>2</sup>) in een lagere reductie in verse biomassa dan bij toepassing van grovere druppels (490 µm), bij gelijkblijvende watertemperatuur van 109°C (Hansson & Mattsson, 2002).

Een hogere *watertemperatuur* zorgt, bij toepassing van dezelfde energiedosis, voor een hogere effectiviteit dan een lagere watertemperatuur. Hansson & Mattsson (2002) vonden voor witte mosterd (*Sinapis alba* L.) behandeld in het 4-bladstadium een significante reductie van de ED<sub>90</sub> met 15% bij het toepassen van een watertemperatuur van 125°C in vergelijking met 105°C (ED<sub>90,105°C</sub> = 584 kJ/m<sup>2</sup> en ED<sub>90,125°C</sub> = 494 kJ/m<sup>2</sup>, bepaald 7 dagen na behandeling).

*Uitvloeiers* zijn oppervlakte-actieve stoffen die zorgen voor o.a. een betere spreiding van vloeistofdruppels (bv. gewasbeschermingsmiddelen) op oppervlakken, door verlagen van de oppervlaktespanning (Zabkiewicz, 2000). Hansson & Mattsson (2002) vonden dat uitvloeiers, onafhankelijk van de energiedosis, zorgen voor een grotere effectiviteit van de heetwatertechniek. Toevoeging van een uitvloeier aan heet water zorgde, bij proeven op witte mosterd (*Sinapis alba* L.) verkerend in het 7-bladstadium, voor een extra reductie in vers gewicht met 27 %.

### Biologische factoren

Biologische factoren die de effectiviteit van heetwatertechniek beïnvloeden zijn de soort, het ontwikkelingsstadium, droogtestress, de waterstatus en de plantdichtheid.

*Soorten* kunnen onderling sterk verschillen in hittetolerantie (Boonen *et al.*, 2013; Vermeulen *et al.*, 2002). Volgende invloedsfactoren bepalen deze gevoeligheid:

- Bladoriëntatie: een steile bladstand zorgt voor een lagere waterretentie waardoor de contactduur tussen het bladoppervlak en het heet water afneemt en de energieoverdracht naar het blad beperkt is.
- Afscherming van de groeipunten: soorten met bovengrondse, afgeschermd groeipunten (bv. rozetplanten en grassen) of ondergrondse groeipunten (bv. rhizoomvormers) zorgen voor een verlaging van de effectiviteit (De Cauwer, 2011). De heetwatertechniek slaagt er wel beter in om bovengrondse, afgeschermd groeipunten te raken in vergelijking met branden (Vermeulen *et al.*, 2004).
- Aard van de opslagorganen: overblijvende soorten met een stevig ondergronds stelsel [o.a. penwortels (bv. paardenbloem, *Taraxacum officinale* L.), wortelknollen (bv. gewoon speenkruid, *Ficaria verna* subsp.



*verna* Huds.), rhizomen (bv. grote brandnetel, *Urtica dioica* L.)] zullen meer (her)groei vertonen waardoor deze lastiger te bestrijden zijn (De Cauwer, 2011; De Cauwer, 2013a).

- Bladvorm of verhouding bladoppervlakte t.o.v. bladdikte: onkruiden met smalle, dikke bladeren (bv. liggende vetmuur (*Sagina procumbens* L.)), met een lage verhouding bladoppervlak t.o.v. bladdikte, zijn lastiger te bestrijden (Boonen *et al.*, 2013). Enerzijds wordt minder energie ontvangen (beperkte warmtestroom, zie Formule 2)) door het kleiner retentieoppervlak. Anderzijds vereist het dikker blad meer energie om onderliggend bladweefsel te verhitten, dit volgens Formule 1.

- Beharing: bij de heetwatertechniek is de beharing van minder belang vermits warmtetransport via geleiding gebeurt. Bij convectieve technieken (bv. branden) speelt de beharing wel een grotere rol door het vormen van een laminaire grenslaag, die convectieve warmteoverdracht bemoeilijkt (De Cauwer & Bulcke, 2011).

Hansson & Ascard (2002) vonden dat *jongere planten* gemakkelijker te verhitten zijn dan oudere planten. Bij proeven op witte mosterd (*Sinapis alba* L.) was de  $ED_{90}$  voor planten in het 6-bladstadium namelijk 2.7 keer hoger dan de  $ED_{90}$  voor planten in het 2-bladstadium ( $ED_{90,6\text{-bladstadium}} = 970 \text{ kJ/m}^2$  en  $ED_{90,2\text{-bladstadium}} = 340 \text{ kJ/m}^2$ ). Oudere planten vertonen, in vergelijking met jonge planten, meestal een betere afscherming van de groeipunten, een sterkere lignificatie, een beter ontwikkelde cuticula en een grotere biomassa, allen factoren die het verhitten van weefsels bemoeilijken (Ascard, 1995).

*Droogtestress* kan de effectiviteit van een behandeling zowel verhogen als verlagen. Indien de droogtestress gedurende enkele dagen voor de warmtebehandeling plaatsvindt, zijn de planten gevoeliger voor de hitte (o.a. door een lager vochtgehalte in gestresseerde planten) en verhoogt de effectiviteit (Hansson & Mattsson, 2003). Indien de planten echter een lange droogteperiode meemaken, passen ze zich hieraan aan (o.a. via de ontwikkeling van een dikkere cuticula), waardoor ze lastiger te verhitten zijn (Ascard, 1995; Boonen *et al.*, 2013).

De *waterstatus* van planten beïnvloedt de hittegevoeligheid van plantensoorten. Ulloa, *et al.* (2012) vonden voor maïs (*Zea mays* L.), sojaboon (*Glycine max* (L.) Merr.), fluweelblad (*Abutilon theophrasti* Medik.) en groene naalbaar (*Setaria viridis* (L.) P. Beauw) een grote dagvariatie in gevoeligheid ten aanzien van branden. Vanaf zonsopkomst (5u50) tot acht uur na zonsopkomst blijft de gevoeligheid constant, vanaf acht uur na zonsopkomst stijgt de gevoeligheid, om tegen 12 uur na zonsopkomst de maximale gevoeligheid te bereiken. De dagelijkse variatie in de relatieve waterinhoud van planten zou hiervoor verantwoordelijk zijn (Ulloa *et al.*, 2012). Deze kan weergegeven worden aan de hand van de relatieve waterinhoud (RWC), dat de actuele waterinhoud ten opzichte van de maximale waterinhoud in het blad uitdrukt. Naar de middag toe daalt de RWC doordat planten gedurende de ochtend minder water opnemen dan wat ze verliezen door transpiratie. Naar de avond toe stijgt de RWC terug doordat de wateropname groter is dan het waterverlies (Steppe, 2011). Binnen de dag, zijn planten het hittegevoeligst wanneer hun relatieve waterinhoud het laagst is (Ulloa *et al.*, 2012).

Bij grote *plantdichtheden* kunnen planten elkaar afschermen (paraplu-effect) waardoor ze minder aan hitte blootgesteld worden (Ascard, 1995). Hierdoor worden niet alle onkruiden voldoende verhit en daalt de effectiviteit. Hansson & Ascard (2002) vonden, bij het toepassen van heet water van 103°C, voor een

sterk veronkruidde verharding (100% bedekkingsgraad van grindverharding en onkruidhoogte 50 - 100 mm) een hogere ED<sub>90</sub> dan een matig veronkruidde verharding (80-90% bedekkingsgraad en onkruidhoogte 30 - 50 mm), namelijk ED<sub>90,sterk veronkruid</sub> = 1430 kJ/m<sup>2</sup> en ED<sub>90,matig veronkruid</sub> = 484 kJ/m<sup>2</sup> (vollevelds, bepaald op 14 dagen na behandeling). De hogere ED<sub>90</sub> bij de hoogste onkruidbezetting was echter ook deels te wijten aan het verder gevorderd ontwikkelingsstadium.

### 2.2.3. Eco-efficiëntie

Eco-efficiëntie is een relatief jong begrip dat in 1992 door de World Business Council for Sustainable Development gedefinieerd werd als de verhouding van de waarde van de geproduceerde goederen of diensten ten opzichte van de invloed op het milieu. Hierbij kan de invloed op het milieu enerzijds naar brongebruik (bv. energie en water), anderzijds naar emissie (bv. broeikasgassen) verwijzen. Wanneer er meer product- of dienstenwaarde gecreëerd wordt met een lagere impact op het milieu, stijgt de eco-efficiëntie van een proces of activiteit (Reheul & De Smet, 2007; Lehni, 2000).

Om te komen tot een eco-efficiënte onkruidbestrijding met heet water, moet zo veel mogelijk onkruid bestreden worden met een zo laag mogelijk energie- en waterverbruik en zo weinig mogelijk emissies.

#### 2.2.3.1. Energieoverdrachtsrendement

De eco-efficiëntie per behandeling kan verhoogd worden door technologische verbeteringen die het fossiel energieverbruik verlagen. Hiervoor dient gestreefd te worden naar een zo hoog mogelijk energieoverdrachtsrendement, dat gedefinieerd wordt als het product van het energieconversierendement<sup>17</sup> en het warmteoverdrachtsrendement<sup>18</sup>. Deze rendementen zijn afhankelijk van de toegepaste thermische bestrijdingstechniek. In Tabel 5 worden richtwaarden weergegeven, vermits exacte waarden sterk afhankelijk zijn van o.a. het gebruikte toestel, het energieconversierendement, het warmteoverdrachtsrendement en het energieoverdrachtsrendement van de verschillende thermische bestrijdingstechnieken bij volleveldsbehandeling (Vermeulen *et al.*, 2002).

Het energieoverdrachtsrendement bij de heetwatertechniek kan voornamelijk verhoogd worden door het warmteoverdrachtsrendement te verhogen. Dit kan o.a. door gebruik te maken van een isolerend schuimdeken of door het gericht behandelen van onkruiden (Boonen *et al.*, 2013). Het Nieuw-Zeelandse Waipuna-systeem maakt gebruik van een heet water schuimdeken (75 tot 100°C) om onkruiden te bestrijden (Tindall *et al.*, 2002). Door het gebruik van hete schuim, op basis van water en bio-afbreekbare alkyl polyglycosides, wordt het warmteverlies naar de lucht verminderd (Nazer *et al.*, 1999). Een ander systeem is de WAVE (Water Als Vitaal Element). Dit systeem maakt gebruik van onkruiddetectiesensoren (o.b.v. stralingsreflectie of chlorofylfluorescentie) om de onkruiden te detecteren op verhardingen en enkel deze, in plaats van de volledige verharding, met heet water te behandelen (WAVE, 2013). Door de gerichte behandeling worden de warmteverliezen naar bodem en lucht sterk gereduceerd. Dit resulteert

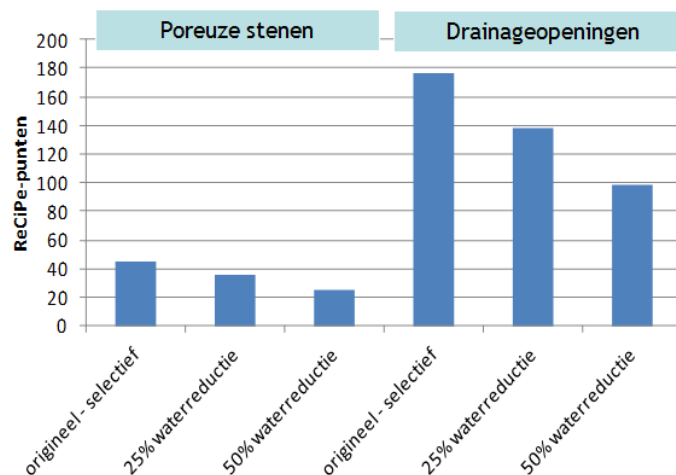
<sup>17</sup> Rendement van de omzetting van brandstof (bv. diesel, lpg) naar bruikbare energie voor onkruidbestrijding (bv. warmte)

<sup>18</sup> Warmteaandeel dat effectief door het onkruid wordt opgenomen en niet verloren gaat aan de bodem en de lucht.

in een verlaging van het fossiel energieverbruik (door verlaging van het heetwaterverbruik) en de negatieve milieuimpact (uitgedrukt als LCA-score, zie 2.1.6.2.). Zo zorgt een halvering van het waterverbruik (aantal liter per m<sup>2</sup> verharding) voor een reductie van 42-44% van de LCA-score, onafhankelijk van het bestratingstype (zie Figuur 9) (De Cauwer, 2013b).

**Tabel 5. Energieconversie-, warmteoverdrachts- en energieoverdrachtsrendement van verschillende thermische onkruidbestrijdingstechnieken bij volleveldsbehandeling (Vermeulen *et al.*, 2002).**

techniek	energieconversie- rendement (%)	warmteoverdrachts- rendement (%)	energieoverdrachts- rendement (%)
Branden	83	18	15
IR-straler	55	14	8
Heet water	80	6	4



**Figuur 9. Het effect van waterreductie (% ten opzichte van standaard sensorgestuurde heetwatertoepassing) op LCA-score (ReCiPe-punten) bij toepassing van sensorgestuurde heetwaterbestrijding op poreuze betonstraatstenen en verhardingen met drainageopeningen (De Cauwer, 2013b).**

### 2.2.3.2. Invloedsfactoren

Om de eco-efficiëntie bij de heetwatertechniek te verbeteren dient het energie- en waterverbruik sterk gereduceerd te worden. Belangrijke invloedsfactoren zijn het *energie- en waterverbruik per behandelingsbeurt* en de *bestrijdingsfrequentie*.

De belangrijkste invloedsfactoren op het **energie- en waterverbruik per behandelingsbeurt** zijn de factoren die een invloed hebben op de effectiviteit (bv. watertemperatuur, ontwikkelingsstadium van de behandelde onkruiden, onkruidsoort en tijdstip van behandeling gedurende de dag; zie 2.2.2.2.) en de factoren die het energieoverdrachtsrendement bepalen (bv. gerichtheid behandeling en schuim; zie 2.2.3.1.).

De benodigde **bestrijdingsfrequentie** wordt beïnvloed door de initiële veronkruiding, de omgevingsfactoren, de ingestelde bestrijdingsdrempel, de ingezette energiedosis en het gehanteerde bestrijdingssysteem (techniek éézijdig toepassen of afwisselend met andere technieken), (Boonen *et al.*, 2013).

Hoe hoger de *veronkruiding* bij aanvang van het groeiseizoen, hoe hoger het aantal benodigde behandelingen (Vermeulen *et al.*, 2007; Rask *et al.*, 2013).

Gunstige *weersomstandigheden* (warm en vochtig weerscondities) gedurende het groeiseizoen zorgen voor een verhoging van de benodigde bestrijdingsfrequentie. Volgens Vermeulen *et al.* (2007) zorgt een gunstig groeiseizoen, op basis van waargenomen onkruidgroei, al snel voor een verhoging van de bestrijdingsfrequentie met 0.5 behandeling per groeiseizoen en een ongunstig groeiseizoen voor een verlaging van 0.5 behandeling per groeiseizoen.

Een *strengere bestrijdingsdrempel* (hogere beeldscore, zie 2.1.1) zorgt bij de verschillende niet-chemische bestrijdingstechnieken op korte termijn (bv. eerste seizoen van behandeling) voor een hogere bestrijdingsfrequentie, met daardoor een lagere eco-efficiëntie t.o.v. een mildere bestrijdingsdrempel. Op lange termijn is dit echter niet meer het geval aangezien jongere onkruiden eenvoudiger te bestrijden zijn dan oudere onkruiden en bij een strengere bestrijdingsdrempel een jongere populatie aanwezig is in vergelijking met een zwakker bestrijdingsdrempel (Boonen *et al.*, 2013).

De *energiedosis* dient voldoende hoog ( $\geq ED_{85}$ ) gekozen te worden. Per behandeling betekent dit een hoger energie- en waterverbruik, maar op langere termijn zal de bestrijdingsfrequentie hierdoor dalen (Boonen *et al.*, 2013).

Bij het monotoon *toepassen van één bestrijdingstechniek*, o.a. de heetwatertechniek, zal de bestrijdingsfrequentie toenemen om eenzelfde beeldscore te bereiken (zie 2.1.6.1.) (Boonen *et al.*, 2013). Om de bestrijdingsfrequentie beperkt te houden en tot een eco-efficiënte bestrijding te komen, dienen verschillende bestrijdingstechnieken dan ook alternerend toegepast te worden. Hierbij is het van belang om elke ingezette techniek met een zo hoog mogelijke eco-efficiëntie toe te passen (Boonen *et al.*, 2013).

In Tabel 6 wordt een overzicht gegeven van toegepaste bestrijdingsfrequenties in verschillende onderzoeken. Zoals af te leiden uit bovenstaande factoren op de bestrijdingsfrequentie zijn deze waarden sterk afhankelijk van de proefopzet en dienen deze dan ook met voorzichtigheid vergeleken te worden.

**Tabel 6. Overzicht van benodigde behandelingsfrequenties (aantal behandelingen per groeiseizoen) om veronkruiding onder de ingestelde bestrijdingsdrempel te houden bij de opgegeven technische kenmerken.**

bron	bestrijdingsdrempel	behandelings-frequentie (beh./seizoen*)	water-temperatuur (°C)	dosis (kJ/m <sup>2</sup> of bestrijdingsniveau)
Hansson & Ascard (2002)	Onkruidhoogte 30 -50 mm	6	115-120 °C	1300 (ED <sub>100</sub> ***)
Vermeulen <i>et al.</i> (2004)	Beeldklasse C**	6	115 °C	ED <sub>95</sub> ***
Vermeulen <i>et al.</i> (2007)	Beeldklasse C**	3 - 6****	ongekend	ED <sub>95</sub> ***
Rask <i>et al.</i> (2013)	2% bedekkingsgraad	3	95°C (Waipuna)	751

\*Gemiddelde duur groeiseizoen van 210 dagen.

\*\*Geringe onkruidgroei (<25% voegbedekkingsgraad, enig omhoogschietend onkruid en enige polvorming)

\*\*\* ED<sub>100</sub>: 7 dagen na behandelen, 100% reductie onkruidvegetatie; ED<sub>95</sub>: 3 dagen na behandelen, 95% reductie

\*\*\*\* Afhankelijk van de initiële veronkruiding

#### 2.2.4. Rekenvoorbeeld energieverbruik

Ter illustratie van het benodigd energieverbruik bij de onkruidbestrijding met de heetwatertechniek wordt hierna een voorbeeld uitgewerkt. Hierbij is enkel het dieselverbruik van de verwarmingseenheid, nodig om het water op te warmen, in rekening genomen. Ander brandstofverbruik, bv. om het heetwatertoestel te verplaatsen, wordt hierbij buiten beschouwing gelaten.

Het brandstofverbruik dat rechtstreeks verbruikt wordt om onkruiden te verhitten is afhankelijk van volgende parameters: toegediende energiedosis (per m<sup>2</sup> verharding), de initiële watertemperatuur bij inname, de temperatuur van het toegediende (uitstromend of verspoten) heet water, soortelijke warmte van water, het energieconversierendement (van diesel naar warmte om water op te warmen) en de verbrandingswaarde van de brandstof (zie Formule 4). Hierbij wordt de toegediende energiedosis volgens Formule 3 bepaald.

$$\bullet \text{ ED}_{\text{toegediend}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) = \text{ED}_{\text{initieel in water}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) + \text{ED}_{\text{opwarmen water}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) \quad (\text{Formule 3})$$

- met:
- ED<sub>toegediend</sub>: De totale energiedosis omvat in het water bij de toepassingstemperatuur.
  - ED<sub>initieel in water</sub>: De energiedosis in het water bij de initiële temperatuur bij inname in het heetwatertoestel.
  - ED<sub>opwarmen water</sub>: De energiedosis die toegediend wordt om het water op te warmen tot de temperatuur van toepassing

$$\bullet \text{ Brandstofverbruik} \left( \frac{\text{l brandstof}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{ED}_{\text{toegediend}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) - \text{ED}_{\text{initieel in water}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right)}{\text{bruikbare ED} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{l}} \right)} \quad (\text{Formule 4})$$

$$= \frac{(T_{\text{toegediend}}(\text{K}) - T_{\text{initieel}}(\text{K})) * c_{\text{water}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * m \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right)}{\text{verbrandingswaarde} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{l}} \right) * \text{conversierendement} (-)}$$

- met:
- $ED_{\text{toegediend}}$ : Totale energie omvat in het water bij de toepassingstemperatuur.
  - $ED_{\text{initieel in water}}$ : De energiedosis in het water bij de initiële temperatuur bij inname in het heetwatertoestel.
  - bruikbare ED: Energiedosis die vrijkomt bij de verbranding van brandstof (bv. diesel) en kan gebruikt worden om het water op te warmen.
  - $T_{\text{toegediend}}$ : Temperatuur van het toegediende (uitstromend of verspoten) heet water.
  - $T_{\text{initieel}}$ : Temperatuur van water bij inname in heetwatertoestel, voor het opwarmen.
  - $c_{\text{water}}$ : Soortelijke warmte van water, een materiaalconstante onafhankelijk van externe factoren (te verwaarlozen veranderingen in functie van de temperatuur)
  - $m$ : Massa van het op te warmen toegediende water per  $m^2$  verharding, met één kg water gelijk aan één liter water.
  - verbrandingswaarde: Totale energie die vrijkomt bij het verbranden van brandstof.
  - conversierendement: Rendement van de omzetting van brandstof (bv. diesel) naar bruikbare energie voor onkruidbestrijding (bv. warmte).

Het toegepaste (heet)waterverbruik, corresponderend met de toegediende energiedosis, is te berekenen met volgende formule:

$$\bullet \text{ Waterverbruik } \left( \frac{l}{m^2} \right) = \frac{ED_{\text{toegediend}} \left( \frac{kJ}{m^2} \right)}{c_{\text{water}} \left( \frac{kJ}{kg * K} \right) * (T_{\text{toegediend}}(K) - T_{\text{nulpunt celcius}}(K))} \quad (\text{Formule 5})$$

- met:
- $ED_{\text{toegediend}}$ : Totale energie omvat in het water bij de toepassingstemperatuur.
  - $c_{\text{water}}$ : soortelijke warmte van water, een materiaalconstante onafhankelijk van externe factoren (te verwaarlozen veranderingen in functie van de temperatuur).
  - $T_{\text{toegediend}}$ : Temperatuur van het toegediende (uitstromend of verspoten) heet water.
  - $T_{\text{nulpunt celcius}}$ : Nulpunt in graden Celsius omgezet naar graden Kelvin ( $0^{\circ}\text{C} = 273.15 \text{ K}$ ).

Officiële eenheden van temperatuur staan in graden Kelvin. Vermits de totale energiedosis toegediend geldig is tussen nul graden en de toegediende temperatuur dient in formule 5 het nulpunt in graden Celsius ( $0^{\circ}\text{C}$ ) ook omgezet te worden in graden Kelvin. Indien het over een temperatuursverschil gaat, kan het temperatuursverschil zowel in graden Kelvin als graden Celcius gebruikt worden in Formule 4 en 5.

In de praktijk wordt op matig en sterk veronkruidde verhardingen respectievelijk een (vollevelds) energiedosis van grootte-orde 500 ( $\text{kJ}/m^2$  verharding) en 1500 ( $\text{kJ}/m^2$  verharding), bij een watertemperatuur van  $98^{\circ}\text{C}$ , toegepast om 90% van de bovengrondse biomassa te doden.

In de praktijk mag een energie-conversierendement, van diesel naar heet water, van ongeveer 85% aangenomen worden (Vermeulen *et al.*, 2002). De verbrandingswaarde van diesel bedraagt 42,84 (MJ/kg) en de dichtheid bedraagt 0,84 (kg/l) (Rask *et al.*, 2013). Per liter diesel is er dus 35,99 (MJ/l) bruto-energie en 30,6 MJ/l (= 42,84 (MJ/kg) \* 0,84 (kg/l) \* 0,85 (bruikbare energie/bruto-energie) bruikbare energie om het water op te warmen.

Voor een toegediende energiedosis van 1500 kJ/m<sup>2</sup>, een toegediende temperatuur van 98°C en de soortelijke warmte van water gelijk aan 4,181 (kJ/(kg\*K)) bedraagt het waterverbruik per m<sup>2</sup>:

$$\bullet \text{ Waterverbruik } \left( \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \right) = \frac{1500 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right)}{4,181 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * 98 \text{ (K)}} = 3,66 \left( \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \right)$$

Hierbij bedraagt het brandstofverbruik, bij een initiële watertemperatuur van 15°C:

$$\bullet \text{ Brandstofverbruik } \left( \frac{\text{l diesel}}{\text{m}^2} \right) = \frac{(98 - 15)(\text{K}) * 4,181 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right) * 3,66 \text{ (kg/m}^2\text{)}}{35990 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{l diesel}} \right) * 0,85 \text{ (-)}} = 0,0415 \left( \frac{\text{l diesel}}{\text{m}^2} \right)$$

Indien de onkruiden gericht behandeld worden kan er op plantniveau dezelfde energiedosis toegediend worden als er op de volledige verharding zou worden toegediend, maar bij gerichte behandeling is er een gereduceerd totaal waterverbruik en dus ook een gereduceerd totaal energie- of brandstofverbruik. Als voorbeeld wordt het effect van een waterreductie van 25 % en 50 % berekend (zie Tabel 7).

In Tabel 7 wordt een overzicht gegeven van brandstofverbruik bij verschillende energiedosissen en waterreducties. De temperatuur van het heet water dat in contact komt met het onkruid bedraagt 98°C en is bekomen door water van 15°C op te warmen.

**Tabel 7. Waterverbruik, toegediende energiedosis, brandstofverbruik en capaciteit met een standaardbrandstoftank bij de betreffende toegepaste energiedosissen en waterreducties (o.a. door een verbeterde techniek) bij bestrijding van onkruiden op verhardingen met de heetwatertechniek.**

<b>waterverbruik (l/m<sup>2</sup> verharding)*</b>	<b>toegediende energiedosis (kJ/m<sup>2</sup> behandeld oppervlak)</b>	<b>brandstofverbruik (L diesel/m<sup>2</sup>)</b>	<b>capaciteit (m<sup>2</sup>) met standaard brandstoftank (60l)</b>
3.66 (0%)	1500	0.0415	1446
2.75 (25%)	1500	0.0311	1928
1.83 (50%)	1500	0.0208	2892
1.22 (0%)	500	0.0138	4338
0.92 (25%)	500	0.0104	5784
0.61 (50%)	500	0.0069	8676

\* Waterreductie t.g.v. gerichte behandeling van onkruiden staat tussen haken weergegeven

## 3. Materiaal en methoden

### 3.1. Materiaal

#### 3.1.1. Gebruikt substraat

Voor de verschillende proeven werd gebruik gemaakt van gestoomde zandleem grond (afkomstig van de proefhoeve in Melle) en potgrond (samenstelling zie Tabel 8 en 9).

**Tabel 8. Samenstelling van zandleem grond.**

pH(KCl)	5.65
NO <sub>3</sub> -N (mg/ kg)	72.7
NH <sub>4</sub> -N (mg/kg)	42.3
P (mg/kg)	192
K (mg/kg)	151
Na (mg/kg)	27
Ca (mg/kg)	2017
OC (%)	1.11
Klei (%)	8.6
Leem (%)	51.6

**Tabel 9. Samenstelling potgrond (Huis en tuin, DCM).**

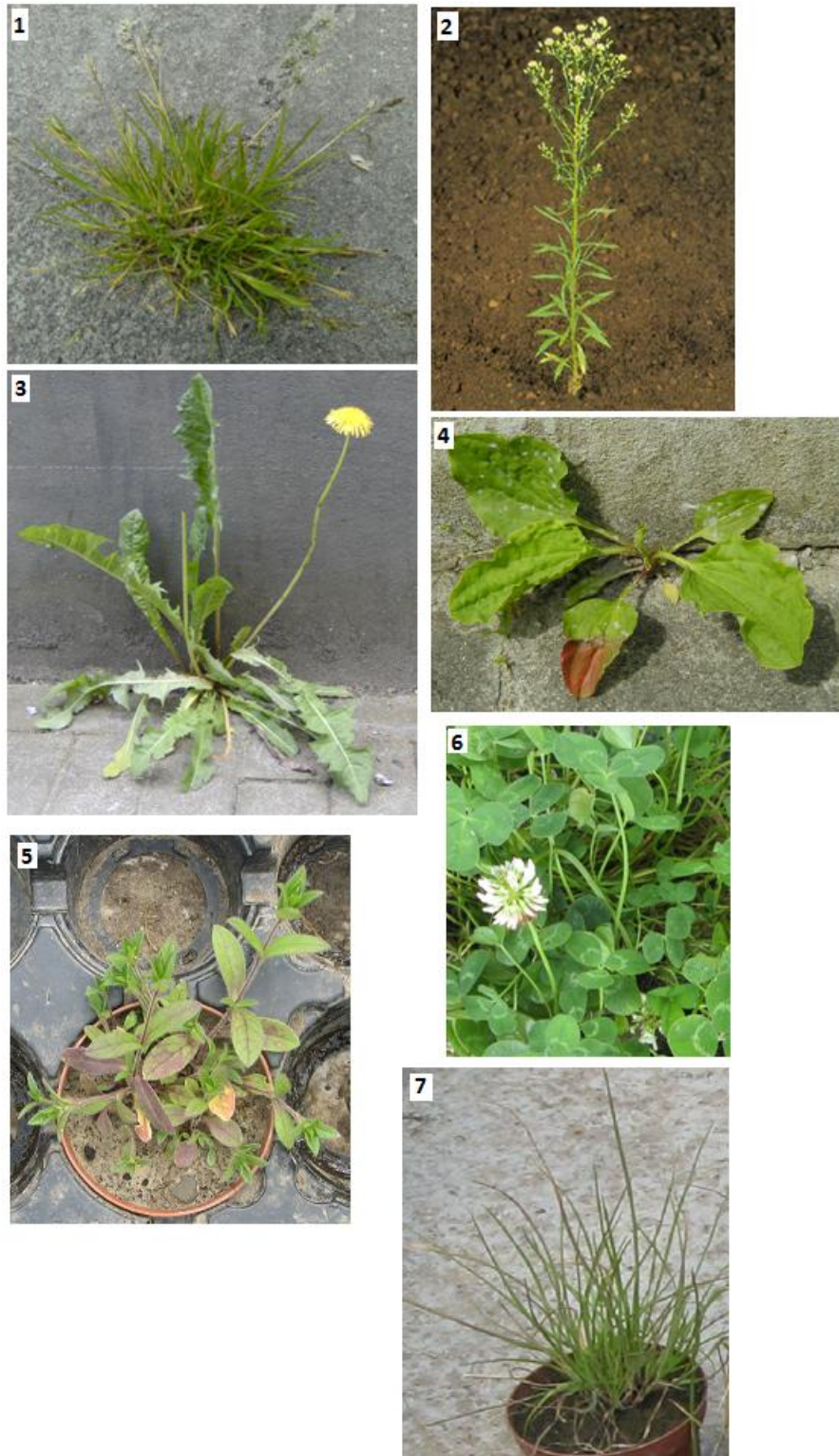
droge stof	30%
organische stof	20%
pH-H <sub>2</sub> O	5.0 - 6.5
elektrische geleidbaarheid	450 µS/cm
minerale meststof	0.5 kg/m <sup>3</sup>
NPK minerale meststof	12 - 14 - 23
Organische meststof	3.5 kg/m <sup>3</sup>
NPK organische meststof	7 - 7 - 10

#### 3.1.2. Gebruikte populaties

De gebruikte soorten met aanduiding van de familie, groep, levenscyclus en voornaamste kenmerken worden in Figuur 10 weergegeven en zijn in Tabel 10 opgelijst . Hierbij werd voor Engels raai gras (*Lolium perenne* L.) zaden van het ras Plenty en voor witte klaver (*Trifolium repens* L.) zaden van het ras Merwi gebruikt. Voor de andere soorten werden zaden afkomstig van lokale populaties gebruikt. Deze zaden werden gedurende de zomer van 2009 op locaties rond de proefhoeve in Melle verzameld. Deze soorten zijn veel voorkomend op verhardingen (zie Tabel 3) en zijn lastig te bestrijden (Fagot *et al.*, 2011).

De planten gebruikt in de experimenten werden opgekweekt in plastic potten (diameter 9 cm) gevuld met een mengsel (1:1) van gestoomde zandleem grond en potgrond (zie 3.1.1). Na het zaaien werden de zaden (50 zaden/pot) m.b.v. een fijne zeef bedekt met 2mm zandleem grond en vervolgens licht aangedrukt. De potten werden geplaatst in een plastic serre (met open zijanten). In het kiemlob- tot twee bladstadium, werden de planten uitgedund tot 3 planten per pot. Vervolgens werden de potten geplaatst op een betonverharding in open lucht. Tijdens de opkweekfase werden de planten éénmalig bemest met 2 g/L Agrolution water soluble fertilizer (NPK: 13 - 5 - 28) 316 Calcium Booster, met een equivalent van 1.68 mg N, 0.65 mg P en 3.63 mg K per pot. De potten werden gedurende de ganse opkweek- en experimentele fase met sprinklers naar behoefte van water voorzien (gemiddeld 3mm/dag).





**Figuur 10. Geteste soorten: 1) straatgras (*Poa annua* L.), 2) Canadese fijnstraal (*Conyza canadensis* (L.) Cronq.) (Rheinmedia GmbH, 2013), 3) paardenbloem (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.) , 4) grote weegbree (*Plantago major* L.), 5) gewone hoornbloem (*Cerastium fontanum* subsp. *vulgare* (Hartm.) Greuter & Burdet), 6) witte klaver (*Trifolium repens* L.) en 7) Engels raaigras (*Lolium perenne* L.).**

**Tabel 10. Overzicht van gebruikte soorten met de wetenschappelijke indeling en biologische kenmerken.**

nederlandse soortnaam	wetenschappelijke soortnaam	familie	zaadlob-groep	levenscyclus	kenmerken
Straatgras	<i>Poa annua</i> L.	<i>Poaceae</i>	Monocotyl	Eén-/tweejarig	Jaarrond bloei, afgeschermd groeipunten, smalle bladeren
Canadese fijnstraal	<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronq.	<i>Asteraceae</i>	Dicotyl	Eénjarig	Behaard, rozetplant met opstaande bloeistengel
Paardenbloem	<i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.	<i>Asteraceae</i>	Dicotyl	Overblijvend	Rozetplant met vlezige penwortel, brede en fijne liggende bladeren
Grote weegbree	<i>Plantago major</i> L.	<i>Plantaginaceae</i>	Dicotyl	Overblijvend	Rozetplant, niet-kruipende rhizomen, brede en lederachtige bladeren
Gewone hoornbloem	<i>Cerastium fontanum</i> subsp. <i>vulgare</i> (Hartm.) Greuter & Burdet	<i>Caryophyllaceae</i>	Dicotyl	Overblijvend	Behaard, liggende stengels, kleine dikke bladeren
Engels raaigras	<i>Lolium perenne</i> L.	<i>Poaceae</i>	Monocotyl	Overblijvend	Afgeschermd groeipunten, smalle opgerichte bladeren
Witte klaver	<i>Trifolium repens</i> L.	<i>Fabaceae</i>	Dicotyl	Overblijvend	Stoloonvormer

### 3.1.3. Heetwaterbehandeling

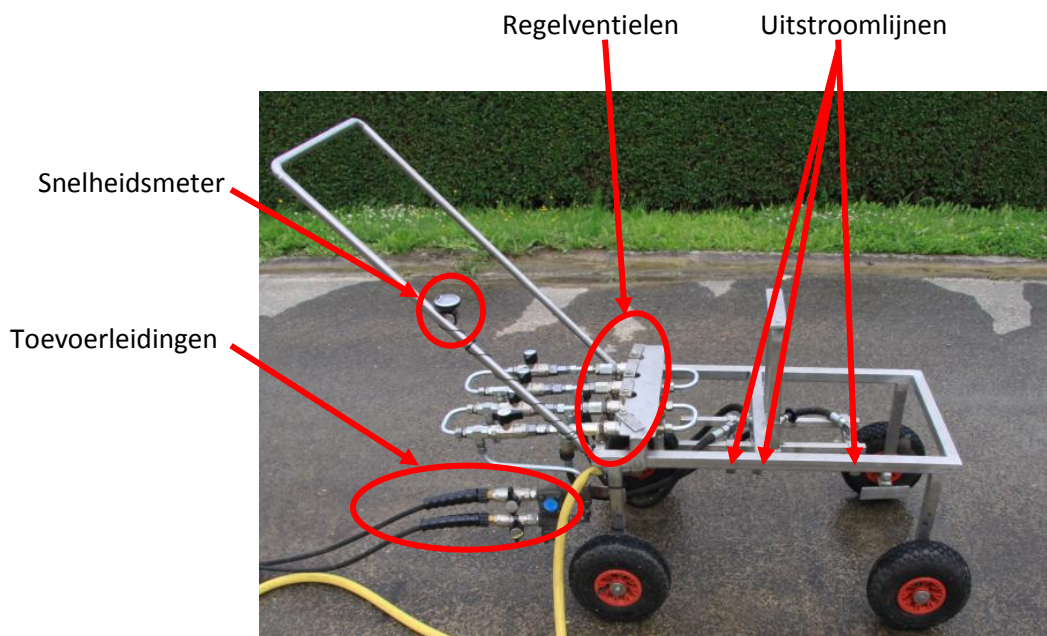
Om het heet water toe te dienen werd door de Nederlandse firma WAVE B.V. een heet water toestel ontworpen waarbij het debiet en de temperatuur van het water kunnen geregeld worden. Het heetwatertoestel bestaat uit een brandergedeelte en een spuitgedeelte. Het brandergedeelte (zie Figuur 11) omvat twee waterpompen (één per brander, aangedreven door een dieselmotor), twee dieselbranders (om het water op te warmen), een watertank van 1000 liter en een drukregeling per brander. Aan dit brandergedeelte is (via twee toevoerleidingen, één per brander) het spuitgedeelte verbonden. Het spuitgedeelte (zie Figuur 12) bestaat uit drie uitstroomlijnen (breedte 12.5, 15 en 25 cm) (zie Figuur 13), met uitstroomgaten met een diameter van 2 mm en een onderlinge afstand van 5 tot 6.5 mm (grotere afstand bij een grotere uitstroombreedte), vier regelventielen en een snelheidsmeter.

Via het aantal ingezette branders (via het aantal open gezette toevoerleidingen), de opgelegde druk, de toegepaste uitstroomlijn en de instelling van de regelventielen werd het benodigde debiet (l/min) (bepalend voor energiedosis bij de gekozen rijsnelheid van 2 km/u, uitstroomlijn en watertemperatuur) en de vereiste watertemperatuur om de proeven uit te voeren ingesteld. De watertemperatuur werd ter hoogte van de uitstroomlijnen via een opvangcilinder gemeten met een digitale thermometer (EAGLE digital thermometer type k, Y137XB)(zie Figuur 14). Het debiet werd gemeten door het water gedurende een halve minuut via de opvangcilinder op te vangen in een maatemmer. Bij de behandeling werden de potten in trays op één lijn geplaatst met een onderlinge potafstand van 20 cm (zie Figuur 15). De

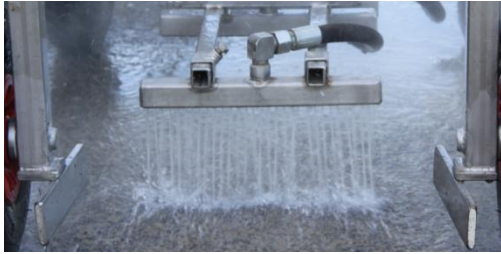
uitstroomlijnen bevonden zich op moment van behandeling 7 cm boven de potrand. De behandelde planten waren steeds vrij van uitwendig vocht.



**Figuur 11.** Brandergedeelte met (v.l.n.r.) watertank, twee branders (in lijn), twee waterpompen en een dieselmotor (drukregeling is via draaiknoppen op zijkant van toestel, niet zichtbaar op deze foto).



**Figuur 12.** Smitgedeelte met twee toevoerleidingen van brandergedeelte, vier regelventielen, drie uitstroomlijnen en een snelheidsmeter (De Cauwer, 2013c).



Figuur 13. Uitstroomlijn met water stromend door de uitstroomgaten (De Cauwer, 2013c).



Figuur 14. Temperatuurbepaling via opvangcilinder ter hoogte van de uitstroomlijn (De Cauwer, 2013c).



Figuur 15. Behandeling van witte klaver met heet water (De Cauwer, 2013c).

## 3.2. Experimenten

### 3.2.1. Experiment 1: Invloed van de plantensoort, het ontwikkelingsstadium en de watertemperatuur op de effectiviteit van heet water

#### 3.2.1.1. Doelstelling

In 2.2.2.2. werd reeds het belang van biologische (o.a. de soort en het ontwikkelingsstadium) en technologische (o.a. de watertemperatuur) factoren op de effectiviteit van de heetwatertechniek besproken. Zo kunnen effectiviteitsverlagende invloedsfactoren het water- en energieverbruik, dat noodzakelijk is voor een aanvaardbare bestrijding (85 - 90%), verhogen (Boonen *et al.*, 2013). Dit experiment bestudeert de invloed van de plantensoort, het ontwikkelingsstadium en de watertemperatuur op de effectiviteit van een heetwaterbehandeling.

#### Onderzoeksvragen:

- D1) Welke heetwatertemperatuur is het effectiefst?
- D2) Welk ontwikkelingsstadium is het gevoeligst ten aanzien van heet water?
- D3) Zijn er interspecifieke verschillen in gevoeligheid ten aanzien van heet water?
- D4) Heeft de toegepaste energiedosis 4 weken na behandeling nog een effect op de biomassa van onkruiden?

### 3.2.1.2. Proefopzet

De verschillende onderzoeksvragen werden beantwoord door het uitvoeren van dosis-respons potexperimenten gedurende de zomer van 2012.

In experiment 1 werden 7 plantensoorten in 3 verschillende ontwikkelingsstadia onderworpen aan 7 energiedosisen en 3 watertemperaturen. Elke combinatie (plantensoort x ontwikkelingsstadium x energiedosis x watertemperatuur) lag aan in 5 parallellen in een compleet gerandomiseerd blokontwerp. De 7 plantensoorten (zie Tabel 10), nl. straatgras, Canadese fijnstraal, paardenbloem, grote weegbree, gewone hoornbloem, Engels raaigras en witte klaver werden op 3 tijdstippen (19 april, 10 mei en 31 mei 2012) volgens het algemeen systeem van opkweek gezaaid (zie 3.1.2). Deze werden op 9 juli 2012 behandeld, zodat de 3 ontwikkelingsstadia respectievelijk 81, 60 en 39 dagen oud waren. In de dosis-respons reeks werden 7 energiedosisen per behandeling voorzien: 0 (de controle), 164, 328, 492, 656, 819 en 983 kJ/m<sup>2</sup>. Deze toegepaste energiedosisen werden volgens Formule 6 berekend. In Tabel 11 zijn de toegepaste uitstroomdebieten in functie van de toegepaste energiedosisen en toegepaste watertemperaturen weergegeven.

$$\bullet \text{ ED}_{\text{toegediend}} \text{ (kJ/m}^2\text{)} = \text{ED}_{\text{uitstromend water}} \text{ (kJ/l)} * \text{uitstroomdebiet (l/m}^2\text{)} \quad \text{(Formule 6)}$$

met:  $\bullet$  ED<sub>toegediend</sub>: De totale energiedosis omvat in het water bij de toegepaste watertemperatuur.

$\bullet$  ED<sub>uitstromend water</sub>: De energie-inhoud van het water bij de toegepaste watertemperatuur

$\bullet$  Uitstroomdebiet: Hoeveelheid water per m<sup>2</sup> toegepast bij de behandeling

Na de behandeling werden de planten op een betonverharding geplaatst om de (her)groei op te volgen. De opvolging gebeurde door 7 dagen na behandeling de bedekking en 28 dagen na behandeling de levende bovengrondse droge biomassa te bepalen (zie 3.1.4).

**Tabel 11. Toegepaste uitstroomdebieten (l/m<sup>2</sup>) in functie van de toegepaste energiedosis en toegepaste watertemperatuur.**

toegepaste watertemperatuur (°C)	0	164	328	492	656	819	983
98	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4
88	0	0,45	0,9	1,35	1,81	2,26	2,71
78	0	0,52	1,03	1,55	2,07	2,59	3,11

Tabel 12 geeft de tijdstippen van zaai, behandeling en oogst met bijhorende weersomstandigheden (gemiddelde temperatuur, neerslag en instraling) gedurende de verschillende periodes van groei (vóór, gedurende en na behandeling) weer.

**Tabel 12. Overzicht van de verschillende tijdsperiodes en heersende weersomstandigheden (gemiddelde luchttemperatuur, neerslag en instraling) voor, gedurende en na behandeling met heet water (Experiment 1).**

ontwikkelingsstadium	periode	T (°C)	neerslag (mm/dag)	instraling (J/cm <sup>2</sup> /dag)
<b>Vóór behandeling</b>				
L1*	19.04 t.e.m. 08.07	14.7	3.9	1633.9
L2	10.05 t.e.m. 08.07	15.9	3.5	1795.1
L3	31.05 t.e.m. 08.07	16.4	4.9	1649.6
<b>Dag van behandeling</b>				
	09.07	17.1	0.6	1210.1
<b>Gedurende behandeling</b>				
	09.07	18.9	0	-
<b>Na behandeling tot oogst</b>				
	10.07 t.e.m. 05.08	17.7	2.3	1702.0

\* L1, L2 en L3: planten met zaaitijd van respectievelijk 19.04.2012, 10.05.2012 en 31.05.2012 en respectievelijk 81, 60 en 39dagen oud op moment van behandelen.

### 3.2.2. Experiment 2: Effectieve en eco-efficiënte bestrijdingsfrequentie

#### 3.2.2.1. Doelstelling

Om planten uit te putten dienen de meeste plantensoorten meermaals verhit te worden (zie 2.2.3.2). In de sectie omtrent de eco-efficiëntie van de heetwatertechniek (zie 2.2.3.2) werd duidelijk dat naast het water- en energieverbruik per behandelingsbeurt, de bestrijdingsfrequentie (in verdere resultaten aangegeven door het bestrijdingsinterval) van groot belang is in de eco-efficiëntie van de heetwatertechniek. In de verdere optimalisatie van de heetwatertechniek is het dan ook van groot belang te weten welke bestrijdingsfrequentie (en bijgevolg bestrijdingsinterval) nodig en optimaal is om een effectieve (doeltreffende) en eco-efficiënte (zo veel mogelijk onkruid bestrijden met een zo laag mogelijke energie- en waterverbruik) behandeling te behalen. Dit experiment focust daarom op de impact van de bestrijdingsfrequentie op de effectiviteit en eco-efficiëntie van eenzijdige heetwaterbehandelingen.

#### Onderzoeksvragen:

D5) Welk bestrijdingsinterval zorgt voor de grootste reductie in biomassa?

D6) Met welk bestrijdingsinterval en welke energiedosis is de heetwatertechniek effectief en eco-efficiënt?

D7) Kunnen onkruiden gedood worden via herhaaldelijk behandelen?

#### 3.2.2.2. Proefopzet

Net als bij experiment 1 werd in experiment 2 gebruik gemaakt van dosis-responsproeven om de onderzoeksvragen te beantwoorden.

In experiment 2 werden 3 plantensoorten blootgesteld aan 7 cumulatieve energiedosissen volgens 4 verschillende bestrijdingsintervallen. Elke combinatie (plantensoort x cumulatieve energiedosis x bestrijdingsinterval) lag aan in 6 parallellen in een compleet gerandomiseerd blokontwerp.

De 3 meerjarige plantensoorten, nl. paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras werden gekozen omdat ze frequent voorkomende onkruiden zijn op verhardingen (zie Tabel 3) en bovendien lastig uit te putten zijn omwille van een stevig ondergrondse wortelstelsel. Deze werden op 23 april 2012 volgens het algemeen systeem van opkweek gezaaid (zie 3.1.2). Op 18 juli 2012 werd de eerste behandeling van alle bestrijdingsintervallen uitgevoerd, op dat moment waren de planten 86 dagen oud. De dosis-respons reeks werden 7 cumulatieve energiedosissen<sup>19</sup> voorzien: 0 (de controle), 656, 1311, 1967, 2622, 3278 en 3934 kJ/m<sup>2</sup>. Deze werden over een proefperiode van 12 weken, bij een watertemperatuur van 98 °C, toegepast. Binnen iedere cumulatieve energiedosis werden 4 bestrijdingsintervallen<sup>20</sup> (nl. 6, 4, 3 of 2 weken) getest gedurende een proefperiode van 12 weken. Dit stemt overeen met respectievelijk 2, 3, 4 of 6 heetwaterbehandelingen. Tabel 13 geeft per cumulatieve energiedosis en bestrijdingsinterval de ingezette energiedosis per behandeling en het corresponderend uitstroomdebiet.

**Tabel 13. Overzicht van de toegepaste energiedosis per behandeling en het corresponderend uitstroomdebiet in functie van de cumulatieve energiedosis ingezet over een periode van 12 weken en het aangenomen bestrijdingsinterval.**

bestrijdings- interval†	cumulatieve energiedosis (kJ/m <sup>2</sup> ) over een periode van 12 weken											
	656		1311		1967		2622		3278		3934	
	dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	debiet (l/m <sup>2</sup> )	dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	debiet (l/m <sup>2</sup> )	dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	debiet (l/m <sup>2</sup> )	dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	debiet (l/m <sup>2</sup> )	dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	debiet (l/m <sup>2</sup> )	dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	debiet (l/m <sup>2</sup> )
6 weken (2)	328	0,8	656	1,60	983	2,40	1311	3,20	1639	4,00	1967	4,80
4 weken (3)	219	0,53	438	1,07	656	1,60	874	2,13	1093	2,67	1311	3,20
3 weken (4)	164	0,40	328	0,80	492	1,20	656	1,60	819	2,00	983	2,40
2 weken (6)	109	0,27	217	0,53	328	0,80	437	1,07	546	1,33	656	1,60

† Aantal behandelingsbeurten per 12 weken staat tussen haakjes vermeld

De planten stonden gedurende de ganse proefperiode op een betonverharding, in open lucht om de (her)groei op te volgen. De opvolging van de (her)groei gebeurde door op regelmatige tijdstippen (3, 8, 17, 33, 44, 56, 66, 75 en 82 dagen na de eerste behandeling) de bedekking en op het einde van de proefperiode (12 oktober 2012) de boven (levend)- en ondergrondse droge biomassa te bepalen (zie 3.1.4).

Tabel 14 geeft een overzicht van de behandelingstijdstippen bij de verschillende bestrijdingsintervallen, met bijhorende gemiddelde luchttemperatuur gedurende de behandeling weer. Tabel 15 geeft de tijdstippen van zaai, behandeling en oogst met bijhorende weersomstandigheden (gemiddelde luchttemperatuur, neerslag en instraling) gedurende de verschillende periodes van groei (vóór, gedurende en na de eerste behandeling) weer.

<sup>19</sup> De som van de energiedosissen per behandeling toegediend gedurende een proefperiode van 12 weken.

<sup>20</sup> Bestrijdingsinterval is de periode tussen twee opeenvolgende behandelingen

**Tabel 14. Overzicht van de behandelingstijdstippen corresponderend met de verschillende bestrijdingsintervallen met bijhorende gemiddelde luchttemperatuur tijdens de behandeling.**

bestrijdingsinterval†	behandelingsdatum met gemiddelde luchttemperatuur gedurende de behandeling							
	18.07 (19.3 °C)	01.08 (26.0 °C)	08.08 (22.0 °C)	16.08 (20.0 °C)	29.08 (21.7 °C)	12.09 (13.0 °C)	18.09 (17.2 °C)	27.09 (14.8 °C)
6 weken (2)	*				*			
4 weken (3)	*			*		*		
3 weken (4)	*		*		*		*	
2 weken (6)	*	*		*	*	*		*

† Aantal behandelingsbeurten per 12 weken staat tussen haakjes vermeld

**Tabel 15. Overzicht van de verschillende tijdsperiodes en heersende weersomstandigheden (gemiddelde luchttemperatuur, neerslag en instraling) voor, gedurende en na de eerste behandeling met heet water (Experiment 2).**

periode	T (°C)	neerslag (mm)	instraling (J/cm <sup>2</sup> )
<b>Voor eerste behandeling</b>			
23.04 t.e.m. 17.07	16.7	4.2	1731.6
<b>Dag van eerste behandeling</b>			
18.07	17.5	0.9	1830.6
<b>Na eerste behandeling tot oogst</b>			
19.07 t.e.m. 10.10	16.4	2.1	1446.4

### 3.2.3. Experiment 3: Intra-dag variatie in gevoeligheid ten aanzien van heet water

#### 3.2.3.1. Doelstelling

Ulloa *et al.* (2012) toonden aan dat de gevoeligheid van planten ten aanzien van branden varieerde gedurende de dag. De vraag rijst dan ook of deze dagvariatie in gevoeligheid ook geldig is bij het toedienen van heet water. Wanneer je planten kan behandelen op een tijdstip van de dag waarop ze het gevoeligst zijn, kan je een effectieve behandeling bekomen met een minimaal energieverbruik (of hoogste eco-efficiëntie)

#### Onderzoeksvraag:

D8) Op welk moment van de dag zijn planten het gevoeligst voor een heetwaterbehandeling?

#### 3.2.3.2. Proefopzet

Net als bij de vorige experimenten werd in experiment 3 gebruik gemaakt van dosis-responsproeven om de onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden.

In experiment 3 werden 3 plantensoorten op 3 tijdstippen onderworpen aan 7 energiedossissen. Elke combinatie (plantensoort x tijdstippen x energiedosis) lag aan in 6 parallellen in een compleet gerandomiseerd blokontwerp.

De 3 plantensoorten, nl. paardenbloem, gewone hoornbloem en Engels raaigras werden gekozen omdat ze frequent voorkomen op verhardingen en verschillende morfologische kenmerken (o.a. bladvorm en



wortelstelsel) hebben. De soorten werden op 7 juni 2012 volgens het algemeen systeem van opkweek gezaaid (zie 3.1.2). Deze werden op 23 juli 2012 behandeld, zodat de planten 46 dagen oud waren. De 7 toegepaste energiedosissen (0, 164, 328, 494, 656, 819 en 983 kJ/m<sup>2</sup>) vormden een dosis-responsreeks die bij een watertemperatuur van 98 °C werd toegepast (zie Tabel 11). Na de behandeling werden de planten op een betonverharding geplaatst om de (her)groei op te volgen. De opvolging gebeurde door 7 dagen na behandeling de bedekking en 25 dagen na behandeling de levende bovengrondse droge biomassa te bepalen (zie 3.1.4).

Tabel 16. geeft de tijdstippen van zaai, behandeling en oogst met bijhorende weersomstandigheden (gemiddelde temperatuur, neerslag en instraling) gedurende de verschillende periodes van groei (vóór, gedurende en na behandeling) weer.

**Tabel 16. Overzicht van de verschillende tijdsperiodes en heersende weerscondities (gemiddelde luchttemperatuur, neerslag en instraling) vóór, gedurende en na behandeling met heet water ( Experiment 3).**

periode	T (°C)	neerslag (mm)	instraling (J/cm <sup>2</sup> )
<b>Voor behandeling</b>			
07.06 t.e.m. 22.07	16.8	4.3	1633.4
<b>Dag van behandeling</b>			
23.07*	19.2	0	2628.8
<b>Gedurende behandeling**</b>			
23.07, ochtend	19.8	0	-
23.07, middag	28.0	0	-
23.07, avond	27.7	0	-
<b>Na behandeling tot oogst</b>			
24.07 t.e.m. 16.08	18.6	0.6	1798.7

\* Zonsopkomst: 5u59, zonsondergang 21u44

\*\*Behandelingstijdstip ochtend: 8u (2u na zonsopkomst), middag: 13u (7u na zonsopkomst), avond: 18u (12u na zonsopkomst).

### 3.2.4. Metingen

Het effect van de heetwaterbehandelingen werd bepaald via de bedekking door de levende biomassa (niet-destructieve meting) en het drooggewicht van de levende biomassa (destructieve meting). Daarnaast werden, net voor de eerste of enige behandeling, de plantkarakteristieken van de verschillende soorten bepaald om het ontwikkelingsstadium op het moment van behandeling aan te geven.

#### 3.2.4.1. Bedekking door de levende biomassa

De bepaling van de bedekking door de levende biomassa, a.d.h.v. foto's, maakt een tussentijdse evaluatie van het effect van de heetwaterbehandeling op de bovengrondse biomassa mogelijk. Bij experimenten 1 en 3 (zie 3.2.1 en 3.2.3) werd de bedekking 7 dagen na behandeling bepaald net zoals in de studies van Hansson & Mattsson (2002, 2003). Bij experiment 2 (zie 3.2.2) werd de groei gedurende

de proefperiode van 12 weken opgevolgd door op regelmatige tijdstippen (3, 8, 17, 33, 44, 56, 66, 75 en 82 dagen na de eerste behandeling) de bedekking te bepalen.

Om de bedekking te bepalen werden de planten gefotografeerd met een CANON PowerShot A710 IS (7,1 megapixels), verbonden aan een statief op 57 cm boven het potoppervlak. Om een uniforme belichting te bekomen werden deze foto's steeds in de schaduw genomen. Deze foto's werden vervolgens geanalyseerd met het vrij beschikbaar beeldverwerkingsprogramma ImageJ (National Institutes of Health, 2013).

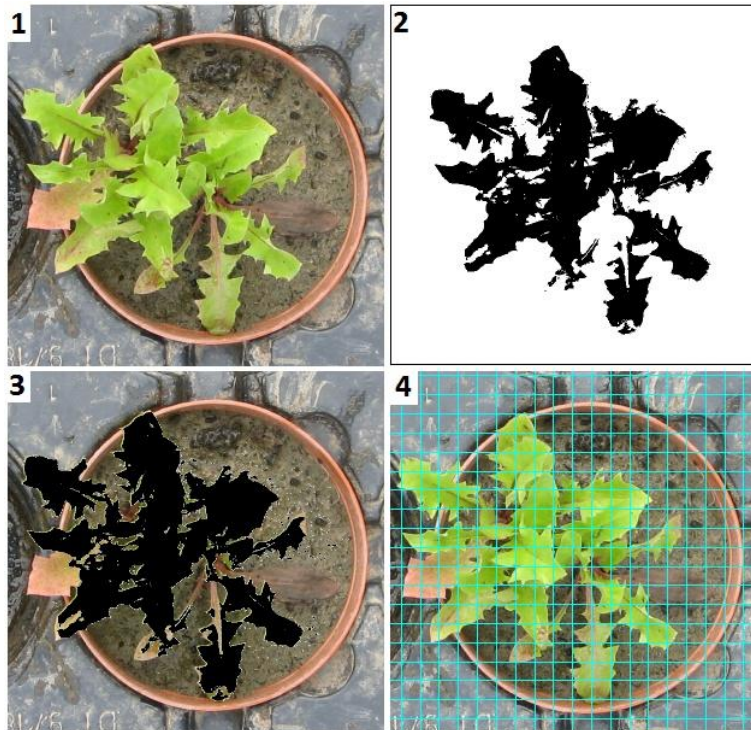
Om bedekking van de levende, groene en soms niet-groene (bv. rood door anthocyaanverkleuring), bovengrondse biomassa te bepalen werd via ImageJ gebruik gemaakt van een raster (grid) en van een HSB-analyse (kleur (Hue), verzadiging (Saturation) en helderheid (Brightness)).

Bij de rastermethode wordt een raster met een bepaalde hokgrootte op de foto's geprojecteerd, waarna manueel, via inschatten van de procentuele bedekking per hok, het aantal hokken ingenomen door levende bovengrondse biomassa per pot geteld wordt. Via het aantal getelde hokken en de hokgrootte wordt de totale bedekking door de levende bovengrondse biomassa per pot in pixels berekend. Bij de HSB-analyse wordt de kleur, verzadiging en helderheid van de foto's ingesteld, op een schaal van 0 tot 250, opdat enkel de groene plantendelen geselecteerd worden. De foto's met de geselecteerde delen worden daarna omgezet tot een zwart-wit foto, waarop ImageJ het aantal zwarte pixels per pot bepaalt. Voor de bepaling van de bedekking werd telkens de volgende meetprocedure gevolgd: Iedere foto werd eerst onderworpen aan een HSB-analyse om de bedekking (pixels/pot) door de groene levende bovengrondse biomassa te bepalen (zie Figuur 16, nr. 1 t.e.m. 3). Vervolgens werd de foto onderworpen aan de rastermethode om de bedekking (pixels/pot) door levende, niet-groene plantendelen te bepalen (zie Figuur 16, nr 4). Bij de rastermethode werd de hokgrootte in functie van de soort (o.a. verschil in bladvorm en plantgrootte) gekozen (zie Tabel 17). De totale bedekking (pixels/pot) door de levende, bovengrondse biomassa is de som van de bedekking door levende groene plantendelen (via HSB-analyse) en de bedekking door niet-groene plantendelen (via rastermethode). Bij de HSB-analyse werden de instellingen voor kleur, verzadiging en helderheid geoptimaliseerd aan de hand van 5 ad random gekozen foto's.

**Tabel 17. Toegepaste hokgroottes bij analyseren van de foto's via de rastermethode.**

soort		hokgrootte (pixels/hok)
Straatgras		800
Canadese fijnstraal		1000
Paardenbloem		1200
Grote weegbree		1000
Gewone hoornbloem		1000
Engels raaigras		1000
Witte klaver*	L1	1500
	L2	5000
	L3	8000

\* L1=81, L2=60 en L3=39 dagen oud



**Figuur 16. Overzicht van de verschillende stappen bij het bepalen van de totale bedekking (aantal pixels) per pot. Stappen: 1) Te analyseren pot met paardenbloem, 2) Meetbare bedekking na HSB-analyse, 3) Vergelijking tussen meetbare bedekking na HSB-analyse en werkelijke bedekking en 4) Bepalen d.m.v. schatten van % bedekking van de niet-groene, levende delen via een raster (1000 pixels/hok).**

#### *3.2.4.2. Drooggewicht van de levende biomassa*

Op het einde van ieder experiment werden de planten geoogst ter bepaling van het drooggewicht van de levende biomassa. Bij experiment 1 (zie 3.2.1) en experiment 3 (zie 3.2.3) werd enkel de droge bovengrondse biomassa bepaald, respectievelijk 28 en 25 dagen na behandeling. Bij experiment 2 (zie 3.2.2) werd de totale (boven- en ondergrondse) biomassa bepaald op het einde (12 oktober 2012) van de proefperiode.

Ter bepaling van de bovengrondse droge biomassa werden (per pot) alle levende bovengrondse plantendelen afgeknipt (2 mm boven grondoppervlak). Bij bepaling van de boven- en ondergrondse droge biomassa werd (per pot) de aarde van de wortels gespoeld. Hierna werden de levende bovengrondse plantendelen afgeknipt van de wortels om de boven- en ondergrondse biomassa afzonderlijk te kunnen bepalen. De geoogste plantendelen werden vervolgens gedurende ca. 12 uur gedroogd in een droogstoof bij 75 °C waarna ze gewogen werden.

#### *3.2.4.3. Plantkarakteristieken*

In de literatuur worden vaak plantkarakteristieken gebruikt om het ontwikkelingsstadium op moment van behandeling aan te duiden. Daarom werden bij de verschillende experimenten, net voor de eerste (experiment 2) of enigste (experiment 1 en 3) behandeling, verschillende plantkarakteristieken bepaald.

In Tabel 18 staan de resultaten van de bepaling van de plantkarakteristieken bij de verschillende experimenten.

Het aantal stoelen, bladeren en spruiten werd bepaald door het aantal per plant te tellen. Het aantal stolonen werd bepaald door het totaal aantal stolonen per pot te tellen en dan te delen door het aantal planten per pot. Om de bloei te kwantificeren werd bij Canadese fijnstraal en gewone hoornbloem het aantal bloeistengels, bij Engels raaigras en straatgras het aantal halmen, bij grote weegbree het aantal aren en bij paardenbloem en witte klaver het aantal bloemhoofden per pot geteld en dan gedeeld door het aantal planten van die pot. Als hoogte werd de gemiddelde hoogte van de planten per pot bepaald. Bij het doorschieten werd het percentage planten per pot bepaald dat reeds aan het doorschieten was.

**Tabel 18 . Overzicht plantkarakteristieken bij de verschillende experimenten**

soort	leeftijd (dagen)	aantal stoelen	aantal bladeren	aantal stolonen	aantal spruiten	hoogte (cm)	bloei (aantal)	doorschieten (%)
<i>Experiment 1</i>								
Canadese	39	-	23.8±2.42	-	-	3.4±0.68	0.0±0.00	26.4±16.17
fijnstraal	60	-	17.6±1.21	-	-	2.1±0.29	0.0±0.00	0.0±0.00
	81	-	12.6±0.60	-	-	2.5±0.52	0.0±0.00	19.8±13.2
Engels raaigras	39	10.4±0.68	-	-	-	8.7±0.37	0.0±0.00	-
	60	7.8±0.58	-	-	-	7.1±0.40	0.0±0.00	-
	81	4.8±0.37	-	-	-	9.0±0.32	0.0±0.00	-
gewone hoornbloem	39	-	-	-	2.1±0.12	-	3.2±0.34	-
	60	-	-	-	1.5±0.08	-	0.9±0.12	-
	81	-	-	-	1.5±0.13	-	0.0±0.00	-
grote weegbree	39	-	5.4±0.24	-	-	4.6±0.68	2.3±0.33	-
	60	-	4.8±0.37	-	-	4.0±0.35	0.7±0.34	-
	81	-	4.6±0.24	-	-	4.7±0.49	0.1±0.07	-
paardenbloem	39	-	6.8±0.37	-	-	9.7±0.94	0.0±0.00	-
	60	-	6.6±0.51	-	-	8.5±0.89	0.0±0.00	-
	81	-	6.2±0.49	-	-	6.5±0.32	0.0±0.00	-
straatgras	39	13.6±0.81	-	-	-	4.6±0.19	7.8±0.58	-
	60	9.0±0.45	-	-	-	3.8±0.34	4.4±0.24	-
	81	6.2±0.58	-	-	-	4.9±0.40	0.6±0.40	-
witte klaver	39	-	-	4.4±0.24	-	14.4±1.03	1.3±0.30	-
	60	-	-	3.6±0.24	-	12.4±0.75	0.5±0.17	-
	81	-	-	2.5±0.23	-	9.2±0.58	0.0±0.00	-
<i>Experiment 2</i>								
paardenbloem	86	-	7.7±0.42	-	-	6.8±0.38	0.0±0.00	-
grote weegbree	86	-	5.2±0.17	-	-	4.0±0.39	2.3±0.26	-
Engels raaigras	86	8.3±0.33	-	-	-	8.0±0.52	0.0±0.00	-
<i>Experiment 3</i>								
paardenbloem	46	-	5.8±0.31	-	-	8.0±0.52	0.0±0.00	-
gewone hoornbloem	46	-	-	-	-	-	0.2±0.07	-
Engels raaigras	46	5.7±0.21	-	-	-	9.5±0.43	0.0±0.00	-

### 3.2.5. Statistische dataverwerking

De statistische verwerking van de verschillende dosis-respons experimenten gebeurde met Excel (versie 2007, microsoft) en het programma R (versie 3.0.0, R Development Core Team, 2013). Het opstellen van de niet-lineaire regressie van de gegevens is gebaseerd op Knezevic *et al.* (2007) en maakt gebruik van het R-software extensie pakket voor dosis-respons curves drc (Ritz & Streibig, 2005).

Bij het opstellen van de dosis-respons curves werden verschillende modellen volgens een vast patroon gefit aan de data. Het initieel gefitte niet-lineair regressiemodel was het log-logistisch model met vier parameters (zie model 1) (Streibig *et al.*, 1993).

$$Y = c + \left\{ d - \frac{c}{1 + \exp[b(\log(x) - \log(e))]} \right\} \quad (\text{Model 1})$$

met als parameters:

- e: ED<sub>50</sub>-waarde (Energiedosis nodig voor 50% biomassa-/bedekkingsreductie)
- b: de relatieve helling van de curve bij het punt e
- c: de ondergrens van de curve
- d: de bovengrens van de curve

Hierin is Y de bedekking door levende biomassa per pot (in #pixels/pot) ofwel de droge biomassa per pot (in g/pot) bij een toegepaste energiedosis x. Met behulp van een likelihood-ratio-test werd nagegaan of het initieel model tot een drie parameter log-logistisch model gereduceerd kon worden. In dit laatste geval wordt de parameter c gelijkgesteld aan 0. Vervolgens werd via een Levene-test bepaald of de data homoscedastisch (gelijkheid van varianties) was. Indien dit niet het geval bleek, werd een Box-Cox transformatie uitgevoerd op de gebruikte modellen. Indien het log-logistisch model niet voldeed werd het vier parameter Weibull model (zie model 2, met dezelfde parameters als het log-logistisch model 1) getest aan de data (Streibig *et al.*, 1993).

$$Y = c + (d - c) * \exp\{-\exp[b(\log(x) - \log(e))]\} \quad (\text{Model 2})$$

Vervolgens werd, analoog aan het log-logistisch model, nagegaan of het model tot een drie parameter Weibull model, met c gelijk aan 0, kon gereduceerd worden en of een Box-Cox transformatie noodzakelijk was om homoscedasticiteit te garanderen (Streibig *et al.*, 1993).

Om de verschillende dosis-respons curves onderling te vergelijken werden bij experimenten 1 en 3 de effectieve dosissen (ED<sub>50</sub> en ED<sub>90</sub>) met bijhorende selectiviteitindices (SI(50,50) en SI(90,90)) en bij experiment 2 de effectieve dosissen (ED<sub>50</sub>, ED<sub>70</sub> en ED<sub>90</sub>) met bijhorende selectiviteitsindices (SI(50,50), SI(70,70) en SI(90,90)) bepaald. De ED<sub>50</sub>, ED<sub>70</sub> en ED<sub>90</sub> zijn de dosissen vereist om de bedekking door levende biomassa of de droge biomassa met respectievelijk 50, 70 en 90% te reduceren. De selectiviteitindices SI(50,50), SI(70,70) en SI(90,90) zijn respectievelijk de ratio tussen de ED<sub>50</sub>, ED<sub>70</sub> en ED<sub>90</sub> dosissen van twee verschillende dosis-respons curves die vergeleken werden. Zowel de ED- als SI-

waarden werden afgeleid uit het regressiemodel door toepassing van de delta methode (Van der Vaart, 1998).

De analyse is gebaseerd op de absolute waarden voor bedekking of droge biomassa, maar zoals aanbevolen door Knezevic *et al.* (2007) werd voor de grafische voorstelling de relatieve waarden gebruikt (bedekking of droge biomassa per pot als percentage van de gemiddelde bedekking of droge biomassa van de controle).

De invloed van de behandelingen op de droge biomassa (uitgedrukt in g/pot) binnen plantensoorten werd horizontaal, verticaal of diagonaal vergeleken met een one-way ANOVA (met één factor, nl. bestrijdingsinterval, behandelingstijdstip of dosis). Bij een horizontale vergelijking werd per toegepaste energiedosis een vergelijking uitgevoerd tussen de bestrijdingsintervallen (bij experiment 2) of de behandelingstijdstippen (bij experiment 3). Hiervoor werd de data opgesplitst volgens toegepaste dosis, zodanig dat per dosis een dataset met enkel de te vergelijken bestrijdingsintervallen of behandelingstijdstippen bekomen werd. Bij een verticale vergelijking werden de verschillende toegepaste dosissen (per behandelingsbeurt bij experimenten 1 en 3 of cumulatieve energiedosissen bij experiment 2) onderling vergeleken. Hiervoor werd de data opgesplitst volgens de toegepaste factoren (soort, bestrijdingsinterval of behandelingstijdstip) zodat datasets met enkel één te vergelijken dosis-respons reeks overbleven. Deze opsplitsingen van de datasets werden uitgevoerd om mogelijke interactie-effecten tussen de factoren (bv. dosis en bestrijdingsinterval bij proef B) uit te sluiten. Bij de diagonale vergelijking, bij experiment 2, werd de data opgesplitst volgens een zo gelijk mogelijke dosis per behandeling tussen de verschillende bestrijdingsintervallen. Via Excel werden de diagonale vergelijkingen ( $\pm$ SE) met aanduiding van de significante verschillen geploteerd.

De homoscedasticiteit van de data werd geverifieerd met een Levene-test. De normaliteit van de data werd nagegaan met een Lilliefors test, een box-plot en een QQ-plot van de residuen. Indien de assumptie van normaliteit niet kon weerhouden worden werd de data getransformeerd met een Box-Cox transformatie. Wanneer de assumpties nog niet weerhouden konden worden, werd de niet-parametrische Kruskal-Wallis rank sum test uitgevoerd. Om tenslotte na te gaan waar de significante verschillen op het 5% significantieniveau zich bevonden werd de Tukey HSD test (in geval van homoscedasticiteit) of de Bonferroni test (indien geen homoscedasticiteit) gebruikt.

## 4. Resultaten en discussie

### 4.1. Experiment 1

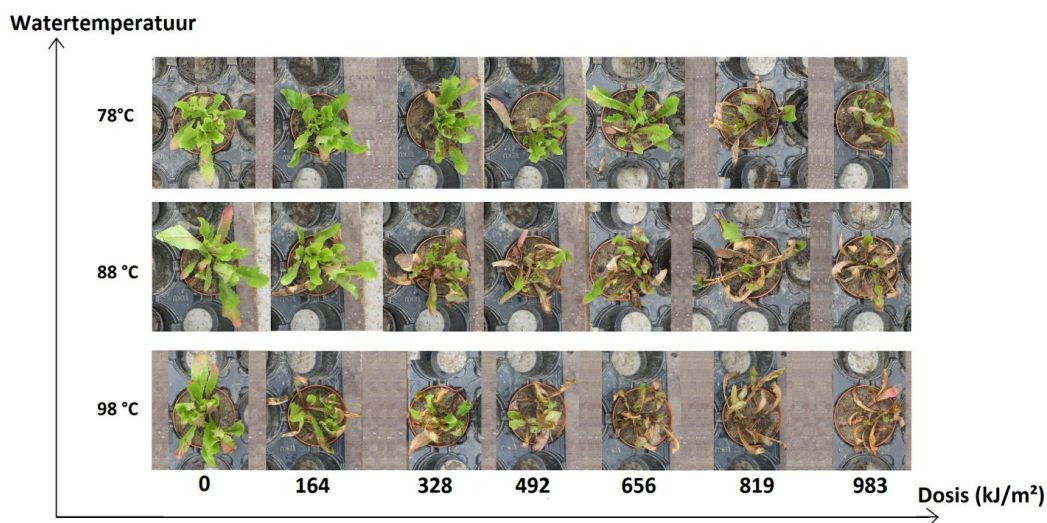
#### 4.1.1. Resultaten

- **Invloed van watertemperatuur op effectiviteit van heet water**

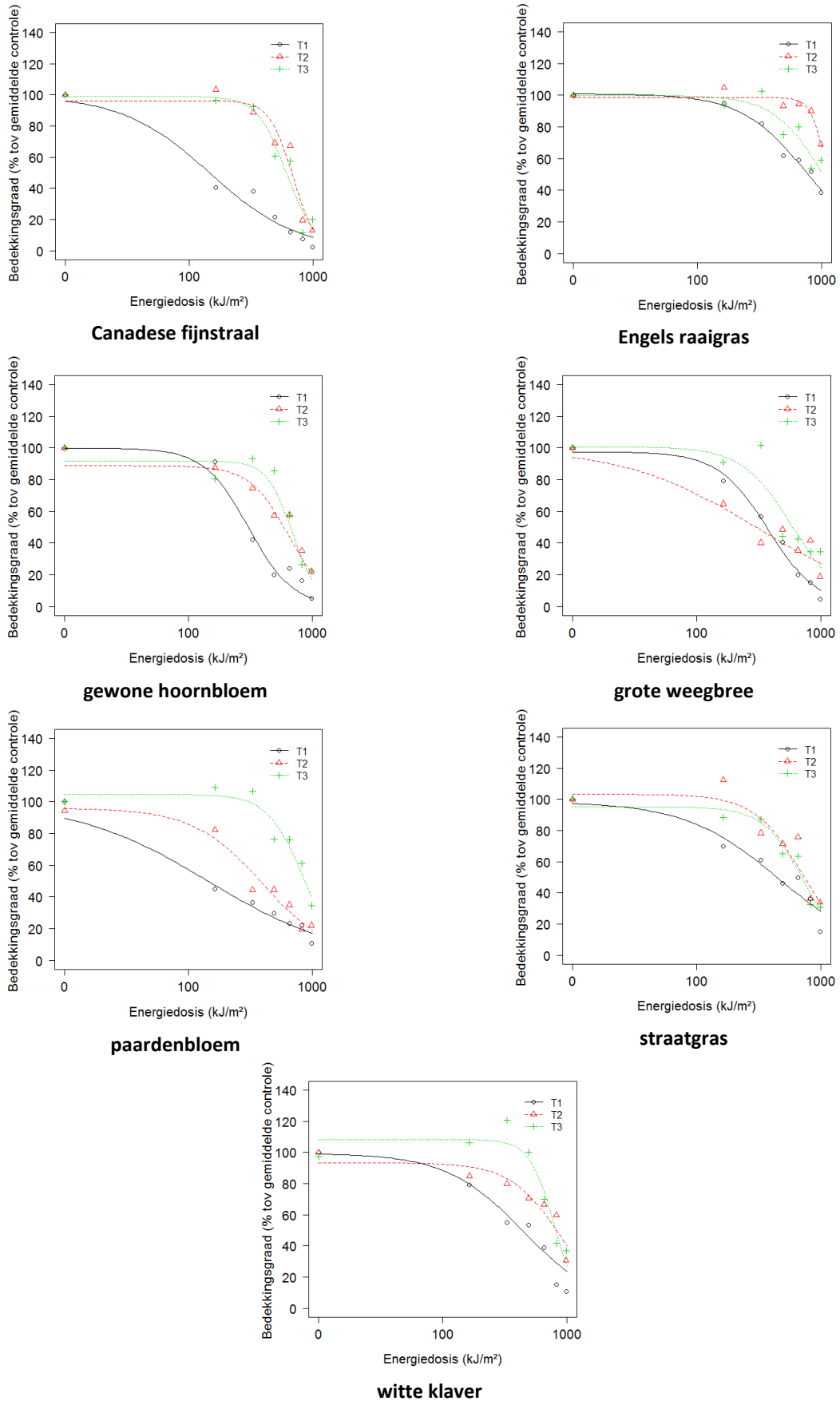
Figuren 18 en 19 tonen, voor respectievelijk het jongste en oudste ontwikkelingsstadium de dosis-respons curves van de plantensoorten behandeld met heet water van 78, 88 en 89°C, op basis van de bedekking 7d na behandeling. De bijhorende ED-waarden en significante verschillen zijn samengevat in Tabel 19. Hoge ED-waarden wijzen op een lage effectiviteit.

Bij het jongste ontwikkelingsstadium zorgt een watertemperatuur van 98 °C (de hoogst toegepaste watertemperatuur) bij alle soorten, behalve bij Engels raaigras, voor een significante reductie in de ED<sub>50</sub>-waarden t.o.v. 88 en 78°C. De ED<sub>50</sub>-waarden bij 98°C zijn bij gewone hoornbloem en paardenbloem respectievelijk 2 tot 6 keer lager dan bij 78 °C. Bij de ED<sub>90</sub>-waarden zorgt 98°C enkel bij gewone hoornbloem en grote weegbree voor significant lagere ED<sub>90</sub>-waarden, die tot 2 keer lager zijn dan bij 78 °C. In Figuur 17 wordt het effect van de watertemperatuur bij paardenbloem weergegeven. Hierop is een hogere reductie in bedekking, dus hogere effectiviteit, bij toepassing van hogere watertemperaturen te zien.

Bij het oudste ontwikkelingsstadium zorgt een watertemperatuur van 98 °C bij gewone hoornbloem en straatgras voor een significante reductie in de ED<sub>50</sub>-waarden t.o.v. 78 en 88°C. De ED<sub>50</sub>-waarden bij 98°C zijn bij gewone hoornbloem tot 3 keer lager dan bij 88 en 78 °C. Bij Engels raaigras, grote weegbree en paardenbloem zorgt 98°C enkel t.o.v. 78°C (niet t.o.v. 88°C) voor een significante reductie van ongeveer 65%. Een watertemperatuur van 98°C resulteert enkel bij grote weegbree in significant lagere ED<sub>90</sub>-waarden die tot 7 en 2 keer lager zijn dan bij 78 en 88°C, respectievelijk .

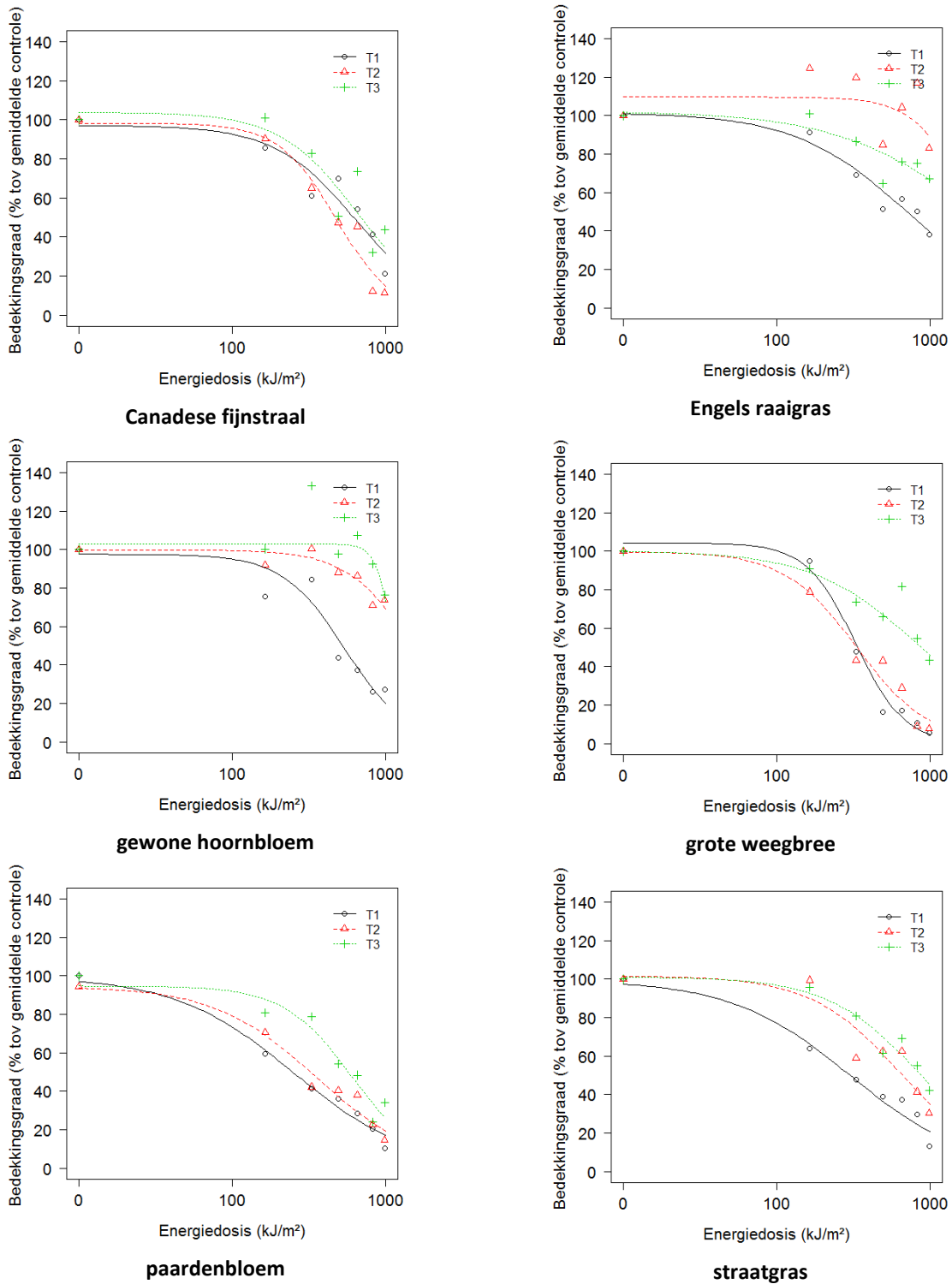


Figuur 17. Effect van de watertemperatuur op de bedekking 7 dagen na behandeling van paardenbloem verkerend in het jongste ontwikkelingsstadium (39d), bij verschillende energiedosissen.



Figuur 18. Dosis-respons curves, gegroepeerd per soort, voor 39d oude planten behandeld met water van 98 (T1), 88 (T2) en 78°C (T3) (respons = de bedekkingsgraad 7d na behandeling).





**Figuur 19. Dosis-respons curves, gegroepeerd per soort, voor 81d oude planten behandeld met water van 98 (T1), 88 (T2) en 78°C (T3) (respons = de bedekkingsgraad 7d na behandeling).**

**Tabel 19. ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden (kJ/m<sup>2</sup>) met SE voor diverse plantensoorten behandeld met water van 78, 88 en 98°C, in het jongste (39 dagen oud) en oudste (81 dagen oud) ontwikkelingsstadium.**

soort	watertemperatuur	jongste ontwikkelingsstadium		oudste ontwikkelingsstadium	
		ED <sub>50</sub>	ED <sub>90</sub>	ED <sub>50</sub>	ED <sub>90</sub>
Canadese fijnstraal	98	146.5±35.71b	880.8±211.83a	640.6±165.47a	2439.9±1530.22a
	88	681.7±72.03a	1090.1±196.84a	475.4±72.64a	1228.5±252.96a
	78	611.0±54.61a	1110.9±173.55a	659.8±87.23a	2392.54±749.46a
Engels raaigras	98	767.0±140.50a	2954.9±1537.38a	686.3±112.37b	4294.2±1905.83a
	88	1104.5±220.18a	1481.0±884.83a	1025.7±93.47b	1104.7±269.19b
	78	1023.6±153.41a	2807.5±1423.37a	1945.3±1031.66a	19700.5±31713.68ab
Gewone hoornbloem	98	304.0±64.92b	750.7±86.92b	535.9±66.73b	1482.3±333.86a
	88	649.2±168.33a	1443.5±399.27a	1488.7±562.89a	4360.4±4593.79a
	78	694.0±70.18a	1171.5±136.56a	1124.6±123.59a	1496.4±439.01a
Grote weegbree	98	373.9±100.81b	1029.4±334.56b	326.4±34.96b	730.9±113.81c
	88	299.3±121.80b	4489.2±4363.16ab	332.7±44.00b	1105.9±192.45b
	78	589.9±66.99a	1644.5±436.63a	868.6±207.77a	5157.8±3799.12a
Paardenbloem	98	144.3±55.99c	2177.7±1158.68a	248.9±50.29b	1743.1±535.56a
	88	400.4±58.61b	1661.6±398.36a	352.6±55.88b	1904.4±496.98a
	78	844.0±71.85a	1748.5±448.33a	604.8±77.59a	1876.1±557.24a
Straatgras	98	454.1±105.75b	3022.8±1459.28a	302.7±60.43b	2161.3±835.91a
	88	715.3±83.51a	1936.6±528.88a	643.8±76.55a	2839.3±812.29a
	78	726.2±53.95a	1652.2±318.44a	858.9±112.09a	3939.8±1622.48a
Witte klaver*	98	440.0±67.59b	2087.3±787.04a	-	-
	88	880.5±96.02a	2459.4±1355.64a	-	-
	78	782.1±37.63a	1285.6±136.61a	-	-

Niet significante verschillen (gebaseerd op de selectiviteitsindices en bijhorende p-waarden) hebben dezelfde letter. Enkel vergelijking binnen eenzelfde ontwikkelingsstadium en plantensoort.

\* Het oudste ontwikkelingsstadium (81d) van witte klaver werd niet geanalyseerd vermits de planten hiervan op moment van de behandelingen te groot waren en dus niet meer representatief voor onkruidgroei op verhardingen.

- **Invloed van het ontwikkelingsstadium op de effectiviteit van heet water**

Figuur 20 geeft per soort de bekomen dosis-respons curves van planten behandeld in verschillend ontwikkelingsstadium, op basis van de bedekking 7 dagen na behandeling. De bijhorende ED-waarden en significante verschillen zijn samengevat in Tabel 20.

Op ED<sub>50</sub>-niveau is er bij grote weegbree, Engels raaigras en straatgras geen verschil in gevoeligheid tussen de ontwikkelingsstadia. Bij Canadese fijnstraal is de ED<sub>50</sub>-waarde van het jongste ontwikkelingsstadium (39d oud) 2 keer lager dan van het tweede ontwikkelingsstadium (60d oud) en 4 keer lager dan het oudste ontwikkelingsstadium (81d oud). Bij gewone hoornbloem en paardenbloem is het jongste ontwikkelingsstadium tot dubbel zo gevoelig als het oudste ontwikkelingsstadium, maar er is geen verschil in gevoeligheid tussen het oudste en tweede ontwikkelingsstadium.

Bij de ED<sub>90</sub>-waarden is er bij grote weegbree, Engels raaigras, straatgras en paardenbloem geen verschil in gevoeligheid tussen de verschillende ontwikkelingsstadia. Bij Canadese fijnstraal zijn het jongste en tweede ontwikkelingsstadium dubbel zo gevoelig als het oudste ontwikkelingsstadium. Bij gewone hoornbloem is het jongste ontwikkelingsstadium dubbel zo gevoelig als het tweede en oudste ontwikkelingsstadium, die onderling niet verschillen in gevoeligheid.

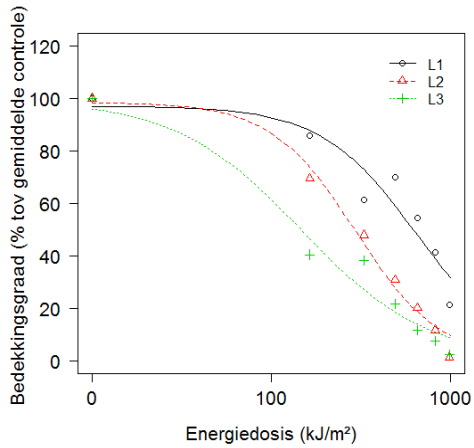
**Tabel 20. ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden (kJ/m<sup>2</sup>) met SE van planten verkerend in verschillend ontwikkelingsstadium bij behandeling met water van 98°C, bij diverse plantensoorten.**

soort**	ontwikkelingsstadium*	ED <sub>50</sub>	ED <sub>90</sub>
Canadese fijnstraal	L1	640.7±123.52a	2441.0±1142.96a
	L2	295.5±43.56b	976.3±170.36b
	L3	146.5±28.25c	880.8±167.56b
Engels raaigras	L1	686.6±95.04a	4291.1±1609.72a
	L2	1393.7±709.85a	15042.4±25801.26a
	L3	766.9±97.67a	2954.0±1068.39a
gewone hoornbloem	L1	535.9±64.71a	1482.3±323.73a
	L2	672.5±46.50a	1348.7±196.08a
	L3	308.4±30.17b	792.4±114.69b
grote weegbree	L1	326.4±32.02a	730.9±104.22a
	L2	234.6±76.31a	1009.00±419.44a
	L3	373.9±49.74a	1029.4±165.07a
paardenbloem	L1	248.81±43.38a	1743.8±462.42a
	L2	191.2±46.64ab	2050.2±736.84a
	L3	144.2±36.72b	2178.8±760.86a
straatgras	L1	302.6±84.35a	2160.6±1166.61a
	L2	310.9±112.42a	2292.4±1574.98a
	L3	454.1±64.12a	3023.3±885.08a

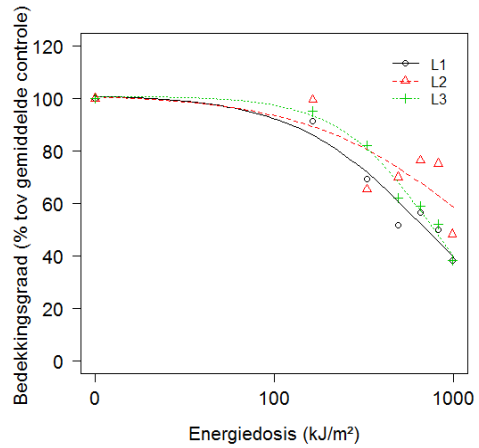
Niet significante verschillen (gebaseerd op de selectiviteitsindices en bijhorende p-waarden) hebben dezelfde letter. Enkel vergelijking binnen eenzelfde ED-waarde en plantensoort.

\* L1 = 81, L2 = 60 en L3 = 39 dagen oud.

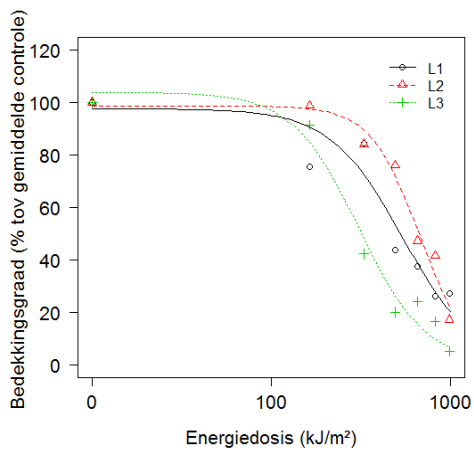
\*\* Witte klaver werd niet geanalyseerd omwille van niet-representatieve afmetingen voor op verhardingen van het L1- en L2-stadium.



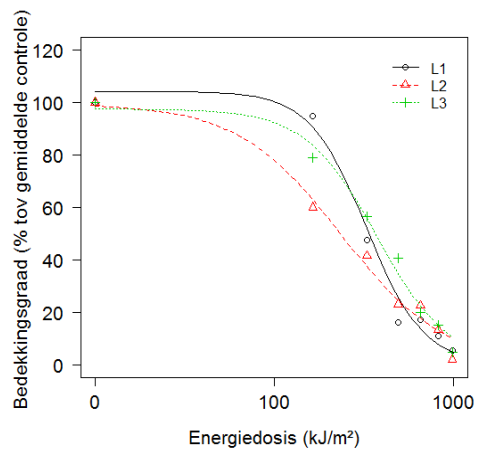
**Canadese fijnstraal**



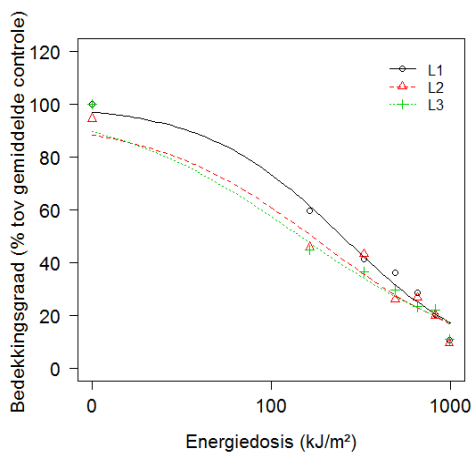
**Engels raigras**



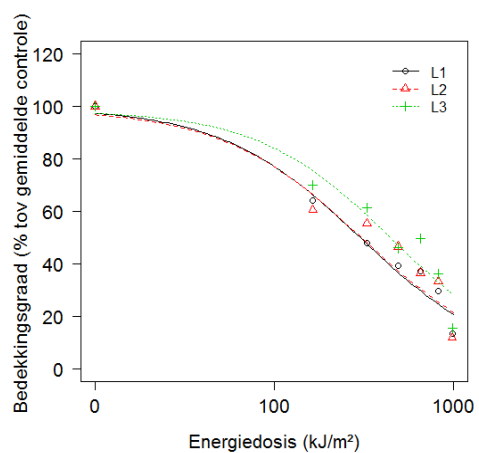
**gewone hoornbloem**



**grote weegbree**



**paardenbloem**



**straatgras**

**Figuur 20. Dosis-respons curves, gegroepeerd per soort, van planten behandeld in drie verschillende stadia (L1 = 81, L2 = 60 en L3 = 39 dagen oud) met heet water van 98°C (respons=bedekkingsgraad, 7 dagen na behandeling).**

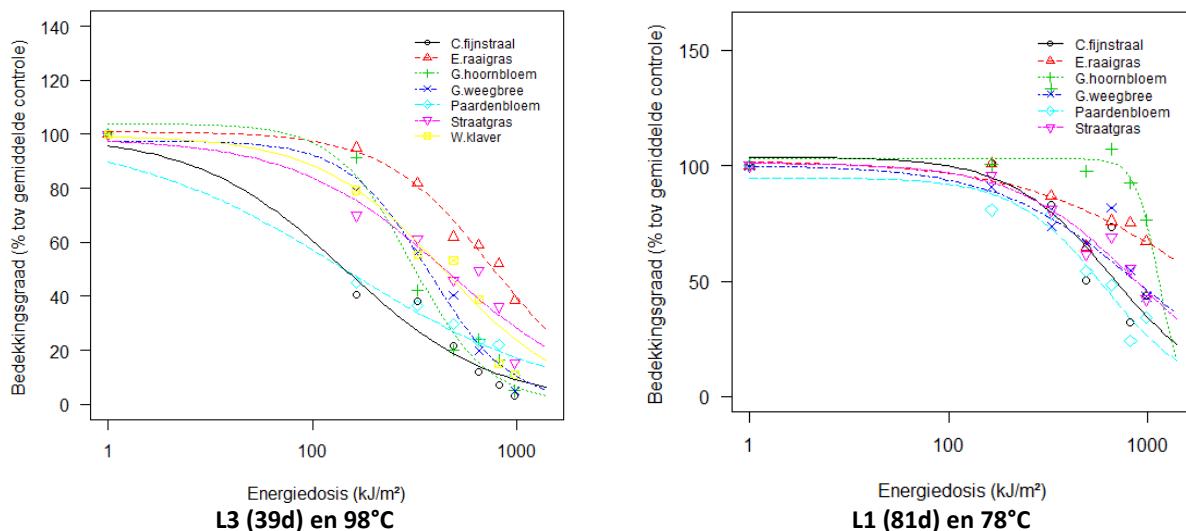
- **Interspecifieke verschillen in gevoeligheid t.a.v. heet water**

Figuur 21 toont de bekomen dosis-respons curves van de plantensoorten voor twee extreme behandelingsomstandigheden, namelijk de behandeling van het jongste stadium (39 oude planten) met water van 98°C enerzijds en de behandeling van het oudste stadium (81 oude planten) met water van 78°C anderzijds. De bijhorende ED-waarden en significante verschillen zijn samengevat in Tabel 21.

Bij het jongste ontwikkelingsstadium behandeld met de hoogste watertemperatuur (98°C) vertonen Canadese fijnstraal en paardenbloem de laagste ED<sub>50</sub>-waarden die tot drie keer lager zijn dan de ED<sub>50</sub>-waarden van Engels raaigras en straatgras. Gewone hoornbloem en Canadese fijnstraal vertonen ED<sub>90</sub>-waarden die tot 3 keer lager zijn dan bij Engels raaigras, straatgras, witte klaver en paardenbloem.

Bij het oudste ontwikkelingsstadium (81d oud) behandeld met de laagste watertemperatuur (78°C) zijn paardenbloem en Canadese fijnstraal de gevoeligste soorten met ED<sub>50</sub>-waarden die 3 keer lager zijn dan die van Engels raaigras, de ongevoeligste soort. Gewone hoornbloem heeft de laagste ED<sub>90</sub>-waarde, die ongeveer 3 keer lager is dan de ED<sub>90</sub>-waarden van grote weegbree en straatgras, met de hoogste ED<sub>90</sub>-waarden. Bij Engels raaigras kon geen betekenisvolle ED<sub>90</sub>-waarde bepaald worden.

De ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden van het jongste ontwikkelingsstadium behandeld met de hoogste watertemperatuur zijn respectievelijk 4 en 2 keer lager dan de ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden van het oudste ontwikkelingsstadium behandeld met de laagste watertemperatuur.



**Figuur 21. Dosis-respons curves van diverse soorten behandeld in het jongste ontwikkelingsstadium (39d) met water van 98°C (Links) of in het oudste ontwikkelingsstadium (81d) met water van 78°C (Rechts) (respons=bedekkingsgraad, 7 dagen na behandeling).**

**Tabel 21. ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden (kJ/m<sup>2</sup>) met SE van de verschillende soorten enerzijds behandeld in het jongste (L3, 39d) ontwikkelingsstadium met water van 98°C en anderzijds behandeld in het oudste (L1, 81d) ontwikkelingsstadium met water van 78°C.**

soort*	ontwikkelingsstadium	watertemperatuur	ED <sub>50</sub>	ED <sub>90</sub>
Canadese fijnstraal	L3	98	144.8±61.53d	911.9±397.14b
Engels raaigras	L3	98	766.9±107.31a	2954.2±1173.98ab
gewone hoornbloem	L3	98	308.4±51.12c	792.4±194.35b
grote weegbree	L3	98	373.9±54.63cb	1029.5±181.30b
paardenbloem	L3	98	144.2±49.89dc	2178.6±1033.43a
straatgras	L3	98	454.0±81.17ab	3023.3±1120.46a
witte klaver	L3	98	440.0±34.47b	2087.3±401.34a
Canadese fijnstraal	L1	78	659.8±122.55bc	2392.4±1052.84bc
Engels raaigras	L1	78	1904.3±774.27a	18622.8±23215.17abc
gewone hoornbloem	L1	78	1124.6±197.23ab	1496.5±700.57c
grote weegbree	L1	78	868.6±184.65bc	5157.7±3376.33ab
paardenbloem	L1	78	604.7±80.31c	1874.6±576.27bc
straatgras	L1	78	858.9±175.07bc	3939.8±2534.22ab

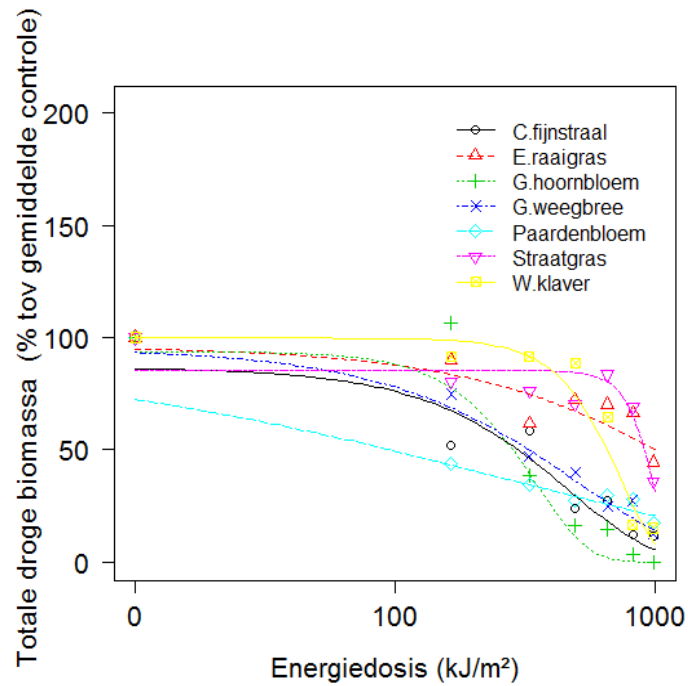
Niet significante verschillen (gebaseerd op de selectiviteitsindices en bijhorende p-waarden) hebben dezelfde letter, enkel vergelijking binnen eenzelfde effectieve dosis en combinatie van ontwikkelingsstadium en watertemperatuur.

\* Witte klaver werd bij L1 en 78°C niet geanalyseerd omwille van niet-representatieve afmetingen van L1- en L2-stadium op verhardingen.

- **Invloed energiedosis op bovengrondse droge biomassa, 28d na behandeling**

Figuur 22 toont de regressies tussen bovengrondse droge biomassa, 28d na behandeling, en de energiedosis, voor plantensoorten behandeld in het jongst stadium. De bijhorende ED-waarden en significante verschillen zijn samengevat in Tabel 22. Zoals blijkt uit Figuur 22 en Tabel 22 is het nog steeds mogelijk dosis-respons curves te plotten aan de bovengrondse droge biomassa 28 dagen na behandeling. Met andere woorden, 28 dagen na behandeling is het reducerend effect van een hoge energiedosis op de biomassa nog steeds aanwezig. Ook zijn er interspecifieke verschillen in gevoeligheid: paardenbloem, gewone hoornbloem, grote weegbree en Canadese fijnstraal hebben ED<sub>50</sub>-waarden die 3 tot 10 keer lager zijn dan de ED<sub>50</sub>-waarden van straatgras en Engels raaigras.

Tabel 23 geeft voor iedere plantensoort de bovengrondse droge biomassa, 28d na behandeling in het jongste ontwikkelingsstadium, in functie van energiedosis en watertemperatuur. Hieruit blijkt dat hoge watertemperaturen, bij gelijkblijvende energiedosis, ook tot 4 weken na een eenmalige behandeling voor een grotere reductie in biomassa dan lagere watertemperaturen zorgen. Zo resulteert t een watertemperatuur van 98, 88 en 78°C, bij de hoogste dosis, bij gewone hoornbloem ( de gevoeligste soort) in een reductie van de biomassa met respectievelijk 100, 89 en 88% t.o.v. de controle. Engels raaigras (de ongevoeligste soort) kent bij deze watertemperaturen respectievelijk 66, 44 en 35% reductie in bovengrondse droge biomassa.



Figuur 22. Dosis-respons curves van de verschillende soorten in het jongste ontwikkelingsstadium (39d) behandeld met water van 98°C (respons=de totale droge biomassa 28d na behandeling).

Tabel 22. ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden (kJ/m<sup>2</sup>) met SE van de verschillende plantensoorten, behandeld in het jongste ontwikkelingsstadium (39d) met water van 98°C..

soort	ED <sub>50</sub>	ED <sub>90</sub>
Canadese fijnstraal	353.3±89.02c	873.9±77.47a
Engels raaigras	1076.6±406.07abd	4448.6±5728.76ab
gewone hoornbloem	295.2±35.14cd	511.5±29.62b
grote weegbree	351.0±91.44cd	1187.4±189.78a
paardenbloem	106.7±103.77cd	2997.9±2540.42ab
straatgras	945.7±46.96a	1134.9±150.78a
witte klaver	653.4±38.89b	969.9±31.11a

Niet significante verschillen (gebaseerd op de selectiviteitsindices en bijhorende p-waarden) hebben dezelfde letter. Enkel vergelijking binnen eenzelfde effectieve dosis.

**Tabel 23. Overzicht gemiddelde bovengrondse droge biomassa (g /pot) ( $\pm$ SE) (geogst 28d na behandeling) van diverse plantensoorten, behandeld in het jongste ontwikkelingsstadium (39d), in functie van toegepaste energiedosis en watertemperatuur.**

dosis (kJ/m <sup>2</sup> )	soort						
	Canadese fijnstraal	Engels raaigras	gewone hoornbloem	grote weegbree	paardenbloem	straatgras	witte klaver
<i>watertemperatuur: 98 °C</i>							
0	0.75 $\pm$ 0.108a	1.44 $\pm$ 0.117a	0.83 $\pm$ 0.090a	1.24 $\pm$ 0.118a	0.96 $\pm$ 0.066a	1.10 $\pm$ 0.083a	4.05 $\pm$ 0.190a
164	0.39 $\pm$ 0.057ab	1.30 $\pm$ 0.144a	0.99 $\pm$ 0.175a	0.93 $\pm$ 0.124ab	0.42 $\pm$ 0.046b	0.88 $\pm$ 0.117a	3.70 $\pm$ 0.12ab
328	0.44 $\pm$ 0.055ab	0.95 $\pm$ 0.074ab	0.32 $\pm$ 0.101b	0.59 $\pm$ 0.135bc	0.33 $\pm$ 0.037b	0.84 $\pm$ 0.113ab	3.70 $\pm$ 0.348ab
492	0.18 $\pm$ 0.024bc	1.03 $\pm$ 0.144ab	0.13 $\pm$ 0.072bc	0.50 $\pm$ 0.062bc	0.26 $\pm$ 0.028bc	0.77 $\pm$ 0.088ab	3.58 $\pm$ 0.211ab
656	0.21 $\pm$ 0.037bc	1.01 $\pm$ 0.123ab	0.12 $\pm$ 0.060bc	0.31 $\pm$ 0.058cd	0.28 $\pm$ 0.013bc	0.92 $\pm$ 0.085a	2.61 $\pm$ 0.489b
819	0.09 $\pm$ 0.029c	0.96 $\pm$ 0.133ab	0.03 $\pm$ 0.025c	0.34 $\pm$ 0.047cd	0.26 $\pm$ 0.041bc	0.76 $\pm$ 0.116ab	0.66 $\pm$ 0.190c
983	0.09 $\pm$ 0.036c	0.64 $\pm$ 0.111b	0.00 $\pm$ 0.000c	0.16 $\pm$ 0.032d	0.17 $\pm$ 0.015c	0.39 $\pm$ 0.059b	0.61 $\pm$ 0.218c
<i>watertemperatuur: 88 °C</i>							
0	0.75 $\pm$ 0.108a	1.44 $\pm$ 0.117a	0.83 $\pm$ 0.090a	1.24 $\pm$ 0.118a	0.96 $\pm$ 0.066a	1.10 $\pm$ 0.083a	4.05 $\pm$ 0.190a
164	0.64 $\pm$ 0.083ab	1.39 $\pm$ 0.143a	0.67 $\pm$ 0.159ab	0.85 $\pm$ 0.167b	0.94 $\pm$ 0.099a	1.22 $\pm$ 0.062a	3.56 $\pm$ 0.101a
328	0.55 $\pm$ 0.091ab	1.45 $\pm$ 0.111a	0.73 $\pm$ 0.178ab	0.75 $\pm$ 0.119bc	0.39 $\pm$ 0.055b	1.05 $\pm$ 0.086ab	3.85 $\pm$ 0.207a
492	0.33 $\pm$ 0.055bc	1.31 $\pm$ 0.141a	0.44 $\pm$ 0.096abc	0.80 $\pm$ 0.038bc	0.43 $\pm$ 0.073b	0.83 $\pm$ 0.104ab	4.06 $\pm$ 0.263a
656	0.39 $\pm$ 0.077bc	1.30 $\pm$ 0.104a	0.58 $\pm$ 0.177abc	0.59 $\pm$ 0.121bc	0.40 $\pm$ 0.089b	1.02 $\pm$ 0.038ab	2.47 $\pm$ 0.219b
819	0.19 $\pm$ 0.043c	1.00 $\pm$ 0.170a	0.27 $\pm$ 0.111bc	0.65 $\pm$ 0.111bc	0.26 $\pm$ 0.064b	0.70 $\pm$ 0.073b	2.40 $\pm$ 0.261b
983	0.17 $\pm$ 0.019c	0.95 $\pm$ 0.120a	0.09 $\pm$ 0.042c	0.28 $\pm$ 0.070c	0.28 $\pm$ 0.045b	0.79 $\pm$ 0.094ab	1.32 $\pm$ 0.226c
<i>watertemperatuur: 78 °C</i>							
0	0.75 $\pm$ 0.108a	1.44 $\pm$ 0.117a	0.83 $\pm$ 0.090a	1.24 $\pm$ 0.118a	0.96 $\pm$ 0.066a	1.10 $\pm$ 0.083a	4.05 $\pm$ 0.190a
164	0.84 $\pm$ 0.135a	1.50 $\pm$ 0.224a	0.71 $\pm$ 0.060a	1.35 $\pm$ 0.223	0.92 $\pm$ 0.160a	1.23 $\pm$ 0.154a	3.69 $\pm$ 0.186a
328	0.68 $\pm$ 0.103ab	1.48 $\pm$ 0.179a	0.81 $\pm$ 0.076a	1.46 $\pm$ 0.032a	0.95 $\pm$ 0.120a	1.21 $\pm$ 0.170a	4.10 $\pm$ 0.293ab
492	0.43 $\pm$ 0.074ab	1.40 $\pm$ 0.095a	0.74 $\pm$ 0.133a	0.76 $\pm$ 0.077a	0.63 $\pm$ 0.035ab	1.02 $\pm$ 0.086a	3.94 $\pm$ 0.288ab
656	0.39 $\pm$ 0.097ab	1.40 $\pm$ 0.241a	0.52 $\pm$ 0.05ab	0.85 $\pm$ 0.146a	0.67 $\pm$ 0.116ab	1.02 $\pm$ 0.062a	2.71 $\pm$ 0.529bc
819	0.11 $\pm$ 0.059b	0.94 $\pm$ 0.135a	0.20 $\pm$ 0.086b	0.71 $\pm$ 0.174a	0.59 $\pm$ 0.091ab	0.75 $\pm$ 0.090a	1.64 $\pm$ 0.120c
983	0.21 $\pm$ 0.050b	1.08 $\pm$ 0.068a	0.10 $\pm$ 0.053b	0.98 $\pm$ 0.174a	0.38 $\pm$ 0.043b	0.75 $\pm$ 0.066a	2.12 $\pm$ 0.320c

\*Biomassa-waarden binnen een soort en watertemperatuur gevolgd door een verschillende letter zijn significant verschillend volgens de Tukey HSD test (in geval van homoscedasticiteit) of de Bonferroni test (in geval geen homoscedasticiteit) op het 5% significantieniveau.

#### 4.1.2. Discussie

Een heetwatertoepassing is effectiever naarmate de *watertemperatuur* hoger is. Een watertemperatuur van 98°C zorgt immers voor ED-waarden die 2 tot 6 keer lager zijn dan bij een behandeling met water van 78 °C. Bij toepassing van een gelijke energiedosis zal een hogere watertemperatuur resulteren in een hogere reductie in bedekking. Ook Hansson & Mattsson (2002) kwamen tot deze bevinding. De hogere effectiviteit van een hogere watertemperatuur is enerzijds te verklaren doordat een hogere fractie van de toegediende energie zich boven de letale weefseltemperatuur (58°C) bevindt en dus in staat is om onkruiden op te warmen tot boven de letale weefseltemperatuur (Hansson & Mattsson, 2002). Anderzijds verhoogt de effectiviteit doordat een hogere watertemperatuur voor een vlottere warmteoverdracht van het water naar de op te warmen weefsels (zie 2.2.1, Formule 2) zorgt: een hogere watertemperatuur zorgt immers voor een grotere temperatuursgradiënt tussen het heet water en het plantoppervlak.



Bij Canadese fijnstraal, gewone hoornbloem en paardenbloem is het jongste *ontwikkelingsstadium*, net als in de studie van Hansson & Ascard (2002) significant gevoeliger voor heet water. Dit verschil in gevoeligheid tussen de verschillende ontwikkelingsstadia is volgens Ascard (1995) te verklaren door o.a. een sterkere ontwikkeling van de cuticula en sterkere lignificatie bij oudere ontwikkelingsstadia. In een aantal gevallen, bv. bij grote weegbree en Engels raaigras, zijn er geen significante verschillen in gevoeligheid tussen de verschillende ontwikkelingsstadia gevonden. Mogelijk kende het jongste ontwikkelingsstadium bij deze soorten reeds een dermate sterke ontwikkeling van de cuticula en lignificatie dat een stadium-effect niet meer aantoonbaar is.

Er zijn duidelijk *interspecifieke verschillen* in gevoeligheid t.a.v. heet water, in termen van reductie in bedekking 7d na behandeling. Over alle experimenten heen, zowel bij het jongste als oudste ontwikkelingsstadium, behandeld met respectievelijk 98°C en 78°C, is de trend dat grassen (Engels raaigras en straatgras) het ongevoeligst zijn voor een eenmalige heetwaterbehandeling. Deze ongevoeligheid is voornamelijk te wijten aan de afgeschermdde groeipunten en de erecte bladstand, waardoor het water snel wegvloeit en er dus een lagere warmteoverdracht is. De gevoeligste soorten zijn Canadese fijnstraal en paardenbloem. Deze soorten hebben een relatief groot bladoppervlak ten opzichte van de bladdikte, wat ervoor zorgt dat er een goede warmteoverdracht plaatsvindt en de weefsels snel verhit worden tot boven de letale weefseltemperatuur (Boonen *et al.*, 2013). De effectiviteit van een eenmalige behandeling zegt evenwel in de meeste gevallen nauwelijks iets over de mogelijkheid tot hergroei, zo kan paardenbloem een sterke hergroei vertonen door de aanwezigheid van een stevige penwortel (De Cauwer, 2013b). Middelmatig gevoelige soorten zijn o.a. grote weegbree en gewone hoornbloem. Grote weegbree bezit lederachtige bladeren en ingezonken groeipunten, hetgeen de plant intrinsiek hitte-toleranter maakt. Het relatief groot bladoppervlak en de vlakke bladstand zorgt daarentegen voor een goede warmteoverdracht van het heet water naar de plant (zie 2.2.1, Formule 2). Bij gewone hoornbloem zorgen de smallere, dikke bladeren voor een lagere gevoeligheid door de slechtere warmteoverdracht en relatief grote op te warmen massa t.o.v. de bladoppervlakte, maar zijn de groeipunten veel minder beschermd tegen de hitte, waardoor ze dus vlotter gedood worden. Naast bovenstaande verschillen in morfologische kenmerken die een interspecifiek verschil in gevoeligheid voor heet water veroorzaken kunnen ook fysiologische kenmerken (bv. verschillend watergehalte) een oorzaak zijn van interspecifieke verschillen in gevoeligheid voor heet water.

Het remmend effect van heet water op de biomassa 4 weken na behandeling neemt toe met toenemende energiedosis en is hoger bij hogere watertemperaturen. De keuze voor het toepassen van een hogere watertemperatuur is dan ook zeer belangrijk, vermits dit ook tot 4 weken na behandeling een groter reducerend effect teweegbrengt. Interspecifieke verschillen in gevoeligheid zijn ook 4 weken na behandeling nog duidelijk aanwezig.

## 4.2. Experiment 2

### 4.2.1. Resultaten

- **Invloed van bestrijdingsinterval en cumulatieve energiedosis op relatieve bedekking door onkruiden**

De drie soorten (paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras) kennen een heel verschillend verloop van de relatieve bedekking in de tijd (Figuren 23, 24 en 25).

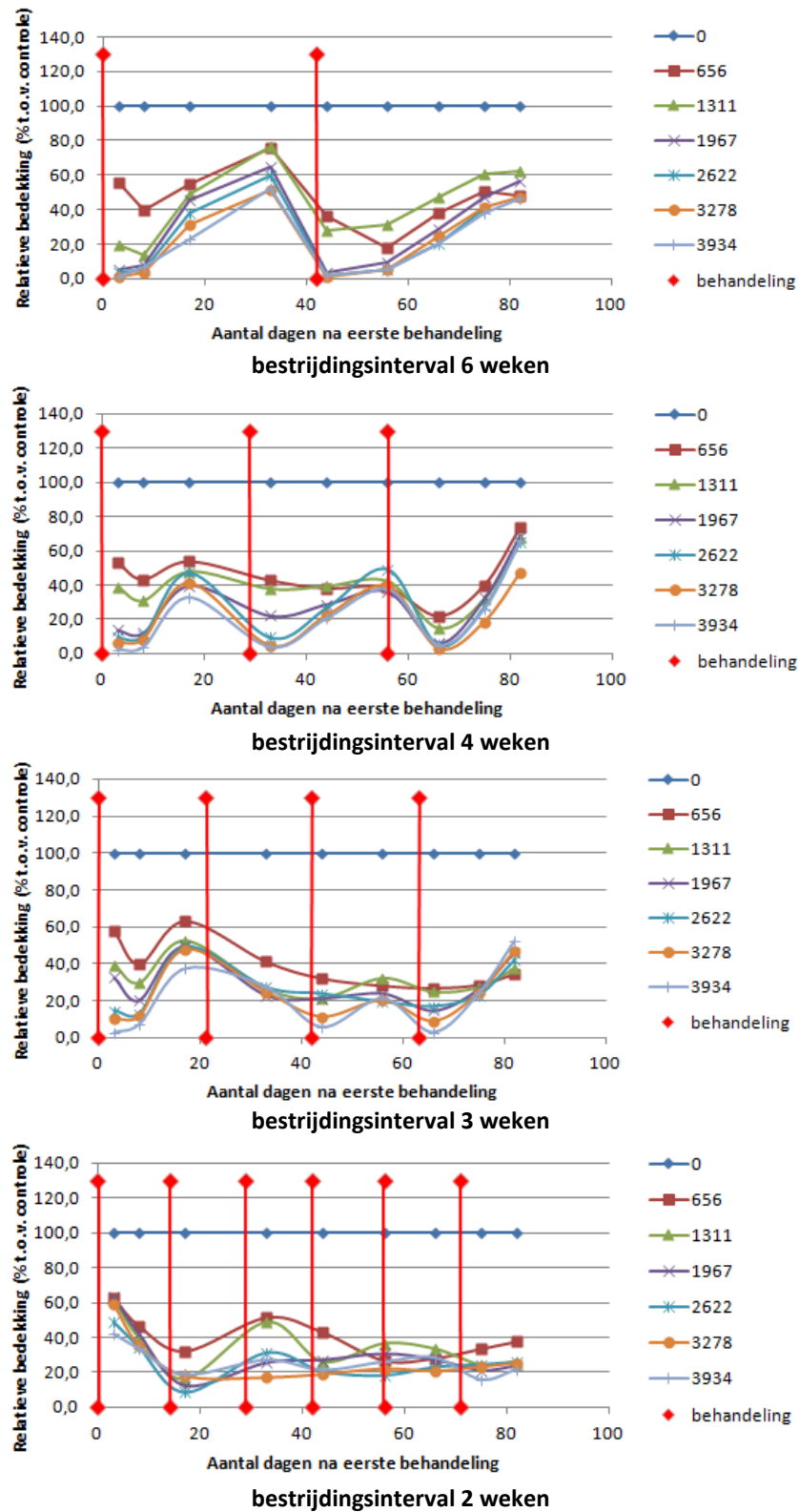
Bij *paardenbloem* varieert de relatieve bedekking bij de verschillende cumulatieve energiedosissen in een relatief klein bereik van 20%, dit onafgezien van het bestrijdingsinterval (zie Figuur 23). Daarnaast resulteert een afnemend bestrijdingsinterval in een grotere reductie in bedekking, onafhankelijk van de ingezette cumulatieve energiedosis. Zo varieert de relatieve bedekking bij het 2 en 6 weken bestrijdingsinterval respectievelijk tussen 22 en 37 % en tussen 43 en 63 %.

Bij *grote weegbree* (zie Figuur 24) neemt de variatie in relatieve bedekking bij de verschillende cumulatieve energiedosissen toe bij een afnemend bestrijdingsinterval, nl. variërend binnen een bereik van 23.1% en 59.4% bij een bestrijdingsinterval van respectievelijk 6 en 2 weken. Daarnaast zorgt het bestrijdingsinterval van 6 weken voor een beduidend lagere maximale reductie in bedekking (ongeveer 40%) in vergelijking met de bestrijdingsinterval len van 4, 3 en 2 weken met respectievelijk een maximale reductie van 72.5, 73.8 en 83%.

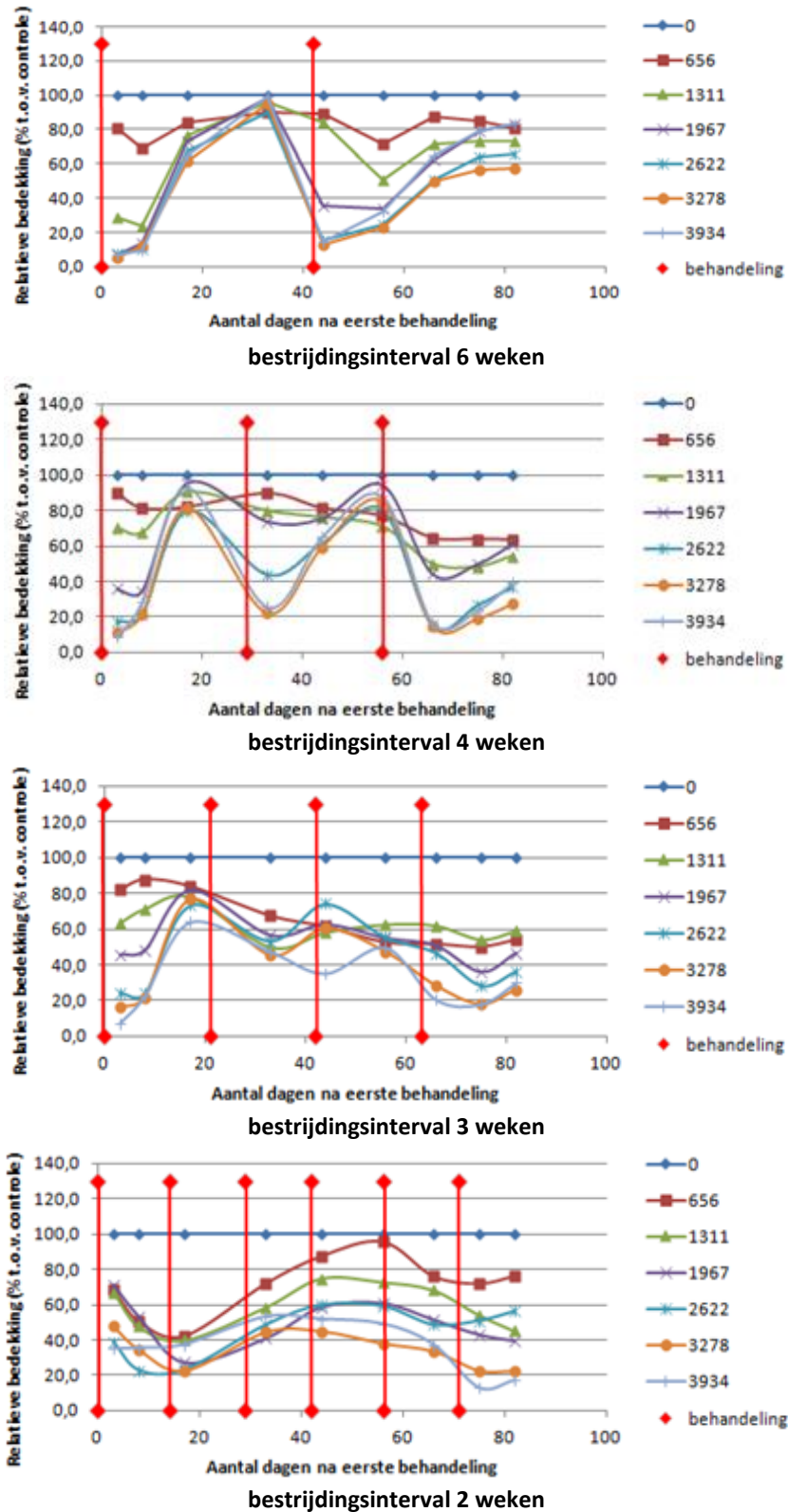
Bij *Engels raaigras* (zie Figuur 25) varieert de relatieve bedekking bij de verschillende cumulatieve dosissen meer dan bij paardenbloem in een bereik van 32 tot 50.8%. In tegenstelling tot bij grote weegbree, is deze variatie bij Engels raaigras in mindere mate afhankelijk van het bestrijdingsinterval. Net als bij grote weegbree wordt bij een bestrijdingsinterval van 6 weken de kleinste maximale reductie in bedekking verkregen (45.8 %, voor het 6 weken bestrijdingsinterval versus 66.9, 71.2 en 73.4% voor respectievelijk het 4, 3 en 2 weken bestrijdingsinterval).

- **Invloed van bestrijdingsinterval en cumulatieve energiedosis op uitputting van onkruiden**

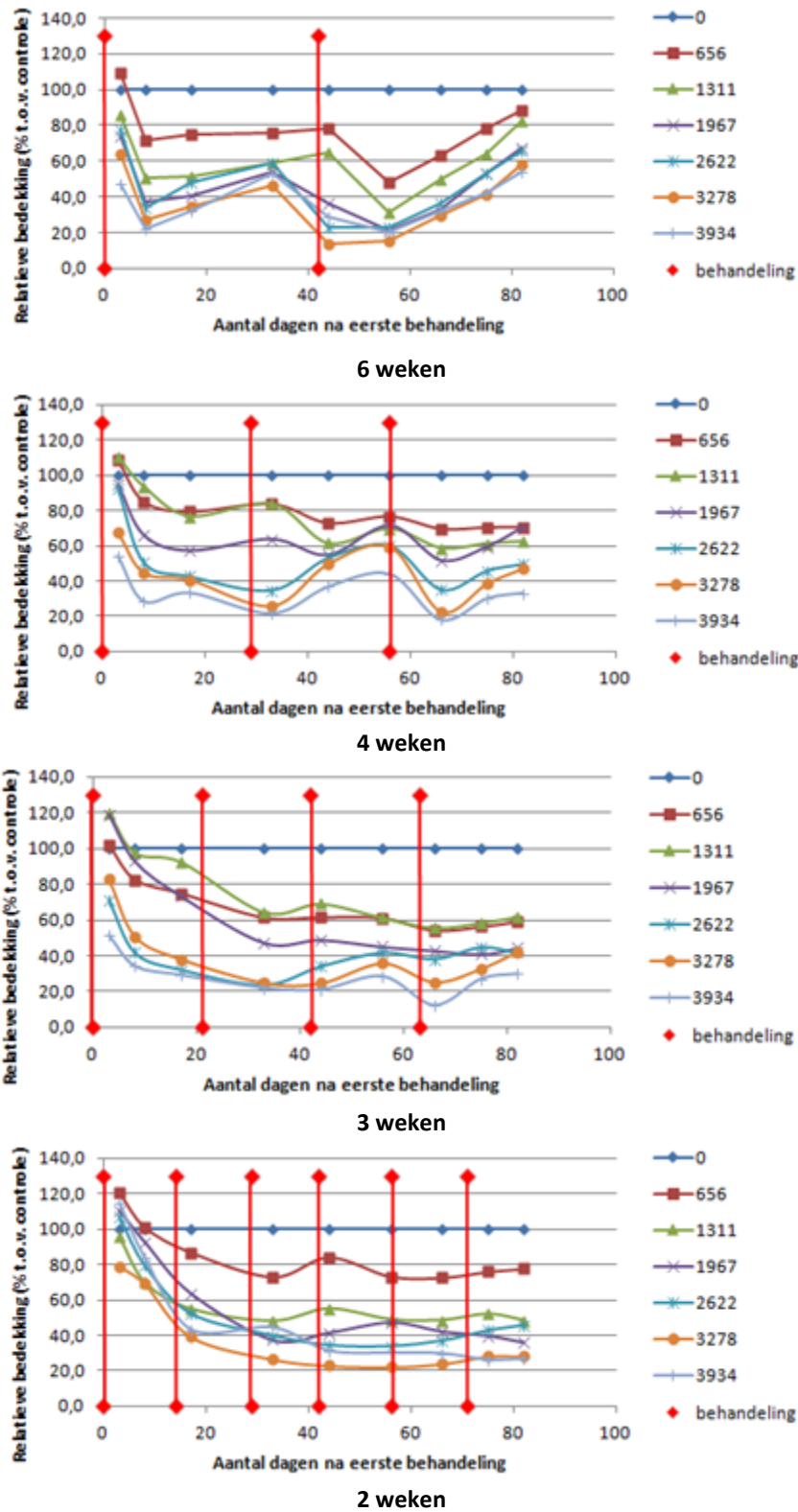
Figuur 26 toont per plantensoort de dosis-respons regressies tussen de totale droge biomassa, 12 weken na de eerste behandeling, en de cumulatieve energiedosis, voor planten behandeld met een verschillend bestrijdingsinterval. De bijhorende ED-waarden en significante verschillen zijn samengevat in Tabel 24. Er konden geen dosis-respons curves opgesteld worden voor het bestrijdingsinterval van 2 weken bij paardenbloem en Engels raaigras en voor het bestrijdingsinterval van 6 weken bij grote weegbree. *Paardenbloem* vertoont enkel op ED<sub>50</sub>-niveau significante verschillen tussen de bestrijdingsintervallen. De ED<sub>50</sub>-waarden zijn ongeveer 2 keer lager bij bestrijdingsintervallen van 3 en 4 weken, onderling niet significant verschillend, dan bij een bestrijdingsinterval van 6 weken. *Grote weegbree* vertoont op alle ED-niveaus geen significante verschillen tussen de bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 weken, ondanks de doorgaans lagere ED<sub>50</sub>- en ED<sub>70</sub>-waarden bij het 3-weken bestrijdingsinterval. *Engels raaigras* vertoont, net als bij paardenbloem, enkel significante verschillen tussen de bestrijdingsintervallen op het ED<sub>50</sub>-niveau. Hierbij neemt de ED<sub>50</sub>-dosis toe met toenemend bestrijdingsinterval. De ED<sub>50</sub>-waarde bij een bestrijdingsinterval van 4 en 6 weken is respectievelijk bijna 2 en 5 keer hoger dan bij een bestrijdingsinterval 3 weken.



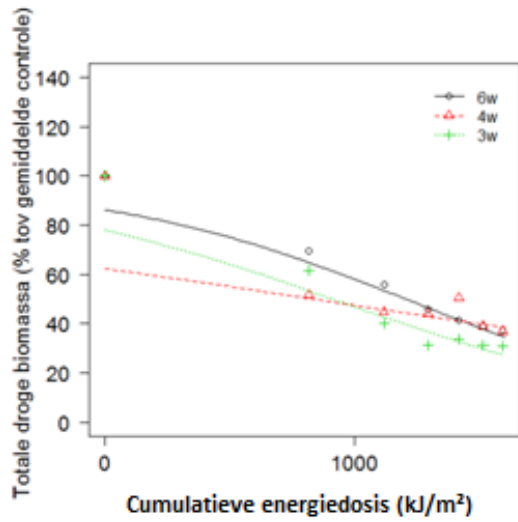
Figuur 23. Verloop van de relatieve bedekking (in % t.o.v. gemiddelde van de controle) van paardenbloem in de tijd voor verschillende cumulatieve energiedosissen en bestrijdingsintervallen (2, 3, 4 en 6 weken). De behandelingenbeurten zijn aangegeven met rode lijnen.



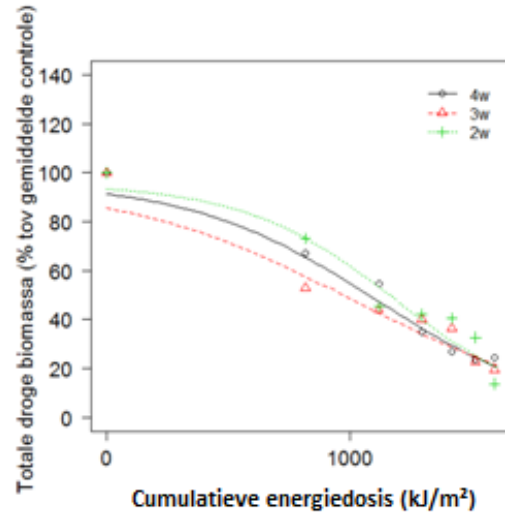
Figuur 24. Verloop van de relatieve bedekking (in % t.o.v. gemiddelde van de controle) van grote weegbree in de tijd voor verschillende cumulatieve energiedosissen en bestrijdingsintervallen (2, 3, 4 en 6 weken). De behandelingenbeurten zijn aangegeven met rode lijnen.



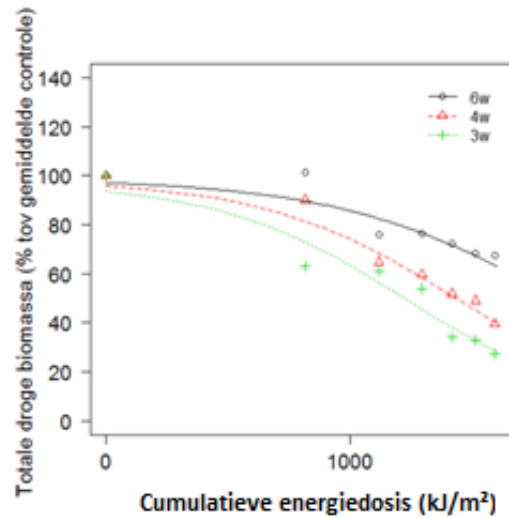
Figuur 25. Verloop van de relatieve bedekking (in % t.o.v. gemiddelde van de controle) van Engels raaigras in de tijd voor verschillende cumulatieve energiedosissen en bestrijdingsintervallen (2, 3, 4 en 6 weken). De behandelingenbeurten zijn aangegeven met rode lijnen.



paardenbloem



grote weegbree



Engels raaigras

Figuur 26. Regressie tussen de totale droge biomassa en de ingezette cumulatieve energiedosis, voor drie plantensoorten behandeld met een bestrijdingsinterval van 2, 3, 4 of 6 weken gedurende een 12 weken durende periode.

**Tabel 24. ED<sub>50</sub>-, ED<sub>70</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden (kJ/m<sup>2</sup>) met SE op basis van de totale droge biomassa, 12 weken na de eerste behandeling, voor de verschillende soorten in functie van het bestrijdingsinterval.**

soort	bestrijdingsinterval	ED <sub>50</sub>	ED <sub>70</sub>	ED <sub>90</sub>
paardenbloem	6 weken	1717.1±372.08a	5685.8±1823.60a	38292.8±31144.00a
	4 weken	813.8±606.35ab	18570.3±25237.00a	2709380.2±11478000.00a
	3 weken	872.7±262.98b	3361.8±700.00a	28820.7±18440.00a
	2 weken	NA	NA	NA
grote weegbree	6 weken	NA	NA	NA
	4 weken	1273.6±233.89a	2683.9±328.75a	8801.1±2293.82a
	3 weken	1032.0±261.29a	2616.8±399.70a	11516.0±4391.14a
	2 weken	1550.0±258.52a	2867.9±307.79a	7644.0±1726.30a
Engels raaigras	6 weken	7349.8±3946.9a	17944.2±16577.59a	74393.0±118124.37a
	4 weken	2792.1±490.37b	5951.2±1785.71a	19872.4±12475.25a
	3 weken	1697.4±358.50c	3831.9±836.94a	14022.7±8171.13a
	2 weken	NA	NA	NA

Niet significante verschillen (gebaseerd op de selectiviteitsindices en bijhorende p-waarden) hebben dezelfde letter, enkel vergelijking binnen eenzelfde effectieve dosis en plantensoort.

\*NA: Niet mogelijk om een dosis-respons curve te fitten aan de bekomen data

In Tabel 25 worden de resultaten van de analyse van de totale droge biomassa samengevat en weergegeven.

Bij *paardenbloem* vertoont de totale droge biomassa, net als bij de relatieve bedekking (zie Figuur 23), slechts een kleine variatie in het effect van de verschillende toegepaste cumulatieve energiedosissen. Enkel bij het bestrijdingsinterval van 3 weken zorgt de hoogst toegepaste dosis (3934 kJ/m<sup>2</sup>) voor een significante halvering van de totale droge biomassa in vergelijking met de laagst toegepaste dosis (656 kJ/m<sup>2</sup>). Bij een bestrijdingsinterval van 6, 4 en 2 weken zijn er geen significante verschillen in droge biomassa tussen de energiedosissen (met uitzondering van de controle). Tussen de bestrijdingsintervallen zijn er bijna geen significante verschillen in reductie in totale droge biomassa. Het bestrijdingsinterval van 3 weken resulteert evenwel doorgaans in de grootste reductie in biomassa, onafhankelijk van de ingezette cumulatieve energiedosis. De maximale reductie in biomassa over de bestrijdingsintervallen heen varieert tussen 54 tot 69 %.

Bij *grote weegbree* zijn er bij de bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 weken significant hogere reducties bij stijgende toegepaste cumulatieve energiedosissen merkbaar. Zo zorgt de hoogst toegepaste cumulatieve energiedosis (3934 kJ/m<sup>2</sup>) bij de bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 weken respectievelijk voor een reductie van 75, 80 en 89% t.o.v. de controle. Het bestrijdingsinterval van 6 weken zorgt, net als bij de relatieve bedekking, voor een lagere maximale reductie van 48% t.o.v. de controle. Tussen de bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 weken zijn onderling amper significante verschillen op te merken. Het bestrijdingsinterval van 6 weken zorgt daarentegen bij de hogere dosissen (3278 en 3934 kJ/m<sup>2</sup>) wel voor significant lagere reductie in biomassa in vergelijking met de kortere bestrijdingsintervallen.

Bij *Engels raaigras* zijn er, net als bij grote weegbree, bij de bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 significant hogere reducties bij stijgende toegepaste cumulatieve energiedosissen merkbaar. Zo zorgt de hoogst toegepaste cumulatieve energiedosis (3934 kJ/m<sup>2</sup>) bij de bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 weken respectievelijk voor een reductie in de totale droge biomassa van 60, 73 en 54% t.o.v. de controle. Bij het bestrijdingsinterval van 6 weken is er ook een stijgende, maar niet significante, reductie in totale

droge biomassa bij toenemende cumulatieve energiedosis merkbaar, met een maximale reductie van 33% bij 3934 kJ/m<sup>2</sup>. Binnen de hogere cumulatieve energiedosis (2622 t.e.m. 3934 kJ/m<sup>2</sup>) is de reductie in biomassa het hoogst voor het bestrijdingsinterval van 3 weken en het laagst voor het bestrijdingsinterval van 6 weken.

- **Invloed van bestrijdingsinterval en energiedosis per behandeling op uitputting<sup>21</sup> van onkruiden**

Figuur 27 vergelijkt de reductie in droge biomassa van bestrijdingsschema's met een verschillend bestrijdingsinterval maar een (quasi) gelijke energiedosis per bestrijdingsbeurt.

Bij toepassing van 328 of 438 kJ/m<sup>2</sup> per behandelingsbeurt is er bij alle soorten geen significant verschil in reductie in totale droge biomassa merkbaar tussen een bestrijdingsintervallen van 4, 3 en 2 weken. Het bestrijdingsinterval van 6 weken zorgt daarentegen bij alle soorten voor een, weliswaar niet altijd significant verschillend, lager (24 tot 49% lager) reductie in totale droge biomassa dan de kortere bestrijdingsintervallen.

Bij toepassing van 656 kJ/m<sup>2</sup> per behandelingsbeurt kent grote weegbree de grootste reductie in totale droge biomassa bij 2-wekelijkse behandeling. Bij paardenbloem zijn er geen significante verschillen tussen de bestrijdingsintervallen, ondanks de grotere reductie bij een bestrijdingsinterval van 3 weken. Bij Engels raaigras zorgt het bestrijdingsinterval van 3 weken voor de grootste reductie in totale droge biomassa. Een bestrijdingsinterval van 2 weken zorgt i.v.m. het bestrijdingsinterval van 3 weken voor een iets kleinere, maar niet significant verschillende reductie.

Bij toepassing van 656 tot 983 kJ/m<sup>2</sup> per behandelingsbeurt is de reductie in totale droge biomassa bij grote weegbree het hoogst bij een bestrijdingsinterval van 2 weken (zie ook figuur 28). Het bestrijdingsinterval van 3 weken vertoont een iets lagere, maar niet significant verschillende, reductie in vergelijking met het interval van 2 weken. Bij paardenbloem zijn opnieuw geen significante verschillen tussen de verschillende bestrijdingsintervallen merkbaar. Bij Engels raaigras zorgt een bestrijdingsinterval van 3 weken voor de hoogste reductie in totale droge biomassa. Een bestrijdingsinterval van 4 of 2 weken zorgt voor een iets lagere, maar niet significant verschillende, reductie in de totale droge biomassa.

Voor alle soorten, grote weegbree, paardenbloem en Engels raaigras, zorgt de combinatie van een bestrijdingsinterval van 3 weken en een energiedosis van 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling of een cumulatieve energiedosis van 3278 kJ/m<sup>2</sup> voor een aanbevolen eco-efficiënte, effectieve en praktisch haalbare bestrijding met een reductie van respectievelijk 67.2, 68.9 en 67.1% in totale droge biomassa, 12 weken na de eerste behandeling. Deze waarden komen ook in grote mate overeen met de ED<sub>70</sub>-waarden bekomen in de dosis-respons regressies (zie Tabel 24).

---

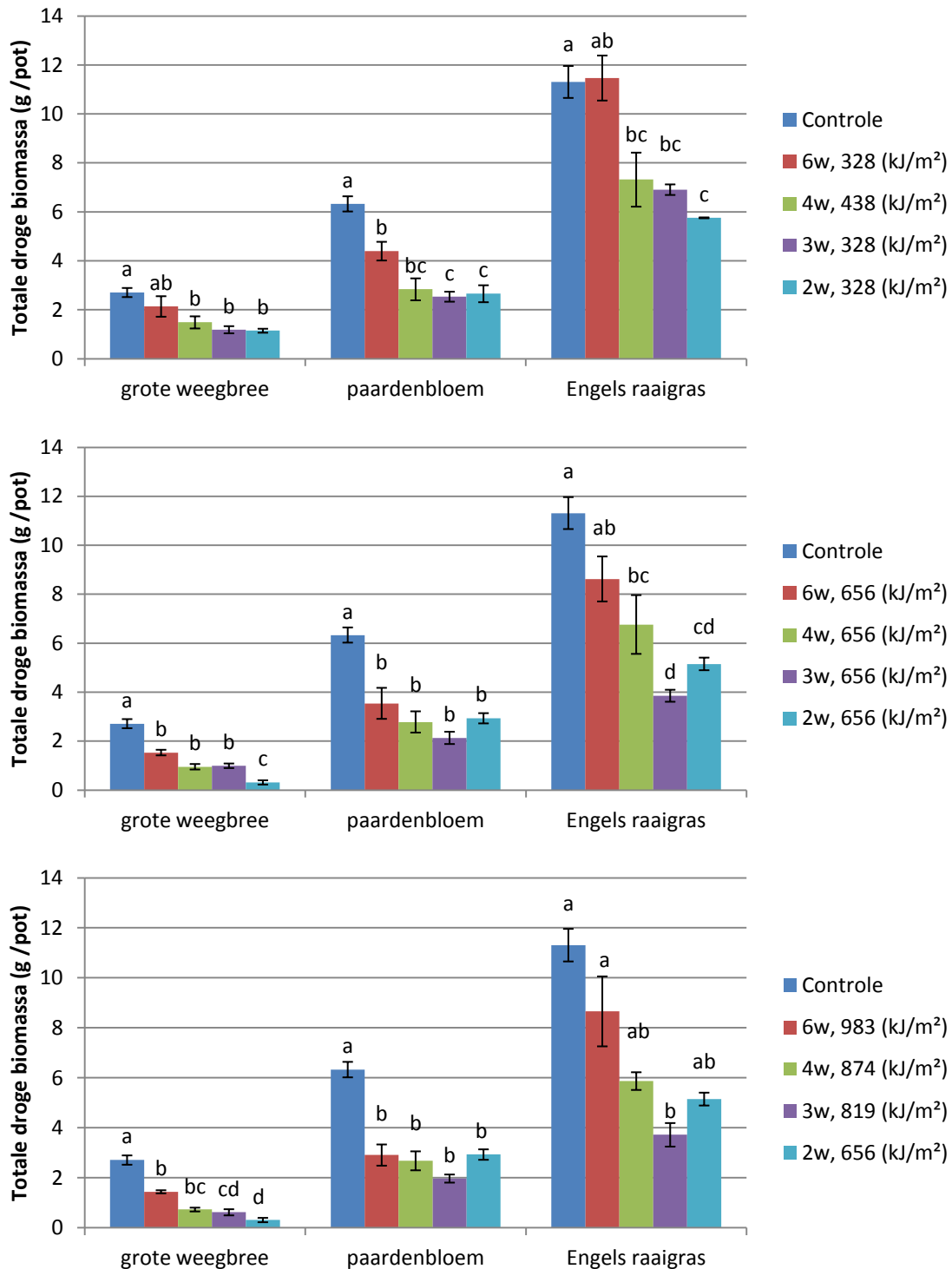
<sup>21</sup> De uitputting van onkruiden is de reductie in biomassa t.o.v. de gemiddelde biomassa van de onbehandelde controle.



**Tabel 25. Gemiddelde totale droge biomassa ( $\pm$ SE) (g/pot) van de verschillende soorten in functie van het bestrijdingsinterval en cumulatieve energiedosis.**

soort	cumulatieve energiedosis (kJ/m <sup>2</sup> )	bestrijdingsinterval <sup>1</sup>			
		6 weken	4 weken	3 weken	2 weken
paardenbloem	0	6.33 $\pm$ 0.310a*	6.33 $\pm$ 0.310a*	6.33 $\pm$ 0.310a*	6.33 $\pm$ 0.310a*
	656	4.40 $\pm$ 0.381ab*	3.27 $\pm$ 0.350b*	3.91 $\pm$ 0.409b*	3.67 $\pm$ 0.474b*
	1311	3.54 $\pm$ 0.633b*	2.84 $\pm$ 0.448b*	2.54 $\pm$ 0.204b*	2.91 $\pm$ 0.251b*
	1967	2.91 $\pm$ 0.424b*	2.78 $\pm$ 0.434b*	2.19 $\pm$ 0.034c*	2.66 $\pm$ 0.346b*
	2622	2.62 $\pm$ 0.090b*	2.68 $\pm$ 0.379b*	2.13 $\pm$ 0.251c*	2.93 $\pm$ 0.271b*
	3278	2.49 $\pm$ 0.065b***	2.46 $\pm$ 0.159b***	1.97 $\pm$ 0.162c**	2.94 $\pm$ 0.319b*
	3934	2.37 $\pm$ 0.354b***	2.34 $\pm$ 0.330b***	1.95 $\pm$ 0.175c**	2.93 $\pm$ 0.209b*
grote weegbree	0	2.71 $\pm$ 0.186a*	2.71 $\pm$ 0.186a*	2.71 $\pm$ 0.186a*	2.71 $\pm$ 0.186a*
	656	2.14 $\pm$ 0.419ab*	1.81 $\pm$ 0.196ab*	1.43 $\pm$ 0.156b*	1.99 $\pm$ 0.219ab*
	1311	1.53 $\pm$ 0.114b*	1.49 $\pm$ 0.248bc*	1.19 $\pm$ 0.146b*	1.37 $\pm$ 0.112bc*
	1967	1.44 $\pm$ 0.062b*	0.95 $\pm$ 0.112cd**	1.09 $\pm$ 0.167b***	1.15 $\pm$ 0.081bc***
	2622	1.38 $\pm$ 0.117b*	0.73 $\pm$ 0.076d**	0.99 $\pm$ 0.093b***	1.10 $\pm$ 0.144bc***
	3278	1.36 $\pm$ 0.099b*	0.64 $\pm$ 0.080d**	0.62 $\pm$ 0.123c**	0.89 $\pm$ 0.143c**
	3934	1.40 $\pm$ 0.152b*	0.67 $\pm$ 0.042d**	0.53 $\pm$ 0.088c****	0.31 $\pm$ 0.087d***
Engels raaigras	0	11.31 $\pm$ 0.652a*	11.31 $\pm$ 0.652a*	11.31 $\pm$ 0.652a*	11.31 $\pm$ 0.652a*
	656	11.47 $\pm$ 0.919a*	10.20 $\pm$ 1.779ab*	7.15 $\pm$ 0.834b*	8.27 $\pm$ 0.614ab*
	1311	8.62 $\pm$ 0.919a*	7.32 $\pm$ 1.103abc*	6.91 $\pm$ 0.216b*	5.79 $\pm$ 0.154bc*
	1967	8.66 $\pm$ 1.400a*	6.76 $\pm$ 1.200bc*	6.11 $\pm$ 0.520b*	5.76 $\pm$ 0.018bc*
	2622	8.19 $\pm$ 0.656a*	5.87 $\pm$ 0.354bc**	3.85 $\pm$ 0.245c***	5.28 $\pm$ 0.359c**
	3278	7.75 $\pm$ 0.922a*	5.55 $\pm$ 0.485bc***	3.72 $\pm$ 0.471c**	5.23 $\pm$ 0.526c**
	3934	7.62 $\pm$ 0.875a*	4.49 $\pm$ 0.662c****	3.07 $\pm$ 0.206c***	5.15 $\pm$ 0.257c***

<sup>1</sup> Waarden gevolgd door een verschillende letter of een verschillend aantal asterixen zijn significant verschillend volgens Tukey HSD of Bonferroni test op het 5 % significantieniveau. Bij de letters enkel vergelijking binnen eenzelfde bestrijdingsinterval en plantensoort en bij de asterixen enkel vergelijking binnen eenzelfde cumulatieve energiedosis en plantensoort.



Figuur 27. Totale droge biomassa, 12 weken na de eerste behandeling, voor de aangeduide soorten 2-, 3-, 4- of 6-wekelijks behandeld met een quasi gelijke energiedosis per beurt (zie legende in figuur). Niet-significante verschillen (volgens Tukey HSD of Bonferroni test op het 5 % significantieniveau) hebben dezelfde letter. Enkel vergelijking binnen soorten.



**Figuur 28.** Invloed van bestrijdingsinterval op uitputting (relatief t.o.v de controle) van de totale biomassa van grote weegbree, 12 weken na de eerste behandeling: v.l.n.r. 0 kJ/m<sup>2</sup> (controle), 4-wekelijks behandelen met 874 kJ/m<sup>2</sup>, 3-wekelijks behandelen met 819 kJ/m<sup>2</sup> en 2-wekelijks behandelen met 656 kJ/m.

In Tabel 26 worden de resultaten van de analyse van de fractie ondergrondse droge biomassa t.o.v. de totale biomassa per pot samengevat en weergegeven.

Bij *paardenbloem* zorgen de behandelingen voor een iets hogere fractie ondergrondse droge biomassa (ongeveer 3%) t.o.v. de controle. Er is echter geen significant effect van de cumulatieve energiedosis groter dan 0 kJ/m<sup>2</sup>, noch van het toegepaste bestrijdingsinterval. Bij *grote weegbree* stijgt, bij bestrijdingsintervallen van 2, 3 en 4 weken, de fractie ondergrondse droge biomassa bij een stijgende cumulatieve energiedosis. Bij het bestrijdingsinterval van 6 weken is er geen effect van de cumulatieve dosis groter dan 0 kJ/m<sup>2</sup>. Bij de hogere cumulatieve energiedossissen zorgt een afnemend bestrijdingsinterval voor een stijgende fractie ondergrondse droge biomassa, waarbij de fractie ondergrondse droge biomassa van het bestrijdingsinterval van 2 weken maximaal 20% hoger is dan bij 6 weken. Bij *Engels raaigras* is er bij de alle behandelingsintervallen geen significant effect van de cumulatieve energiedosis. De fractie ondergrondse droge biomassa neemt af bij een afnemend bestrijdingsinterval. De fractie ondergrondse droge biomassa is bij het behandelingsinterval van 6 weken maximaal 20% hoger dan bij het behandelingsinterval van 2 weken.

**Tabel 26. Gemiddelde percentage ondergrondse droge biomassa ( $\pm$ SE) t.o.v. totale droge biomassa van de verschillende soorten in functie van het bestrijdingsinterval en cumulatieve energiedosis.**

soort	cumulatieve energiedosis (kJ/m <sup>2</sup> )	behandelingsinterval <sup>1</sup>			
		6 weken	4 weken	3 weken	2 weken
paardenbloem	0	91.76 $\pm$ 0.413b*	91.76 $\pm$ 0.413b*	91.76 $\pm$ 0.413c*	91.76 $\pm$ 0.413*
	656	95.26 $\pm$ 0.272a*	94.21 $\pm$ 0.694ab*	95.90 $\pm$ 0.360a*	94.84 $\pm$ 0.590a*
	1311	94.50 $\pm$ 1.143ab*	94.94 $\pm$ 0.566a*	94.35 $\pm$ 0.839ab*	95.64 $\pm$ 0.465a*
	1967	93.62 $\pm$ 1.049ab*	94.34 $\pm$ 0.919a*	94.13 $\pm$ 0.421ac*	95.14 $\pm$ 0.443a*
	2622	95.27 $\pm$ 0.457a*	95.53 $\pm$ 0.498a*	94.34 $\pm$ 0.518ab*	95.91 $\pm$ 0.634a*
	3278	94.24 $\pm$ 0.963ab***	95.50 $\pm$ 0.253a***	93.59 $\pm$ 0.740ac**	96.16 $\pm$ 0.504a*
	3934	93.41 $\pm$ 0.660ab**	94.05 $\pm$ 0.807ab***	92.62 $\pm$ 0.0551bc**	96.04 $\pm$ 0.448a*
grote weegbree	0	64.15 $\pm$ 1.141c*	64.15 $\pm$ 1.141cd*	64.15 $\pm$ 1.141d*	64.15 $\pm$ 1.141d*
	656	69.50 $\pm$ 2.231bc*	61.33 $\pm$ 1.364d*	62.15 $\pm$ 3.173d*	70.16 $\pm$ 1.829cd*
	1311	74.35 $\pm$ 1.704ab*	68.99 $\pm$ 1.553bcd*	71.54 $\pm$ 2.115cd*	76.30 $\pm$ 4.583bc*
	1967	69.90 $\pm$ 2.563bc**	70.90 $\pm$ 1.182bc**	80.13 $\pm$ 1.600bc*	77.02 $\pm$ 1.117bc***
	2622	71.67 $\pm$ 2.187bc**	77.34 $\pm$ 3.762ab***	82.62 $\pm$ 2.251ab*	80.81 $\pm$ 2.251b***
	3278	75.56 $\pm$ 1.445ab**	80.03 $\pm$ 2.597ab**	90.24 $\pm$ 1.161a*	82.90 $\pm$ 2.791ab***
	3934	70.95 $\pm$ 5.446bc**	85.15 $\pm$ 2.982a***	89.50 $\pm$ 3.355ab*	93.26 $\pm$ 2.414a*
Engels raaigras	0	76.30 $\pm$ 1.293b*	76.30 $\pm$ 1.293a*	76.30 $\pm$ 1.293a*	76.30 $\pm$ 1.293a*
	656	83.91 $\pm$ 1.247a*	83.83 $\pm$ 2.725a*	72.75 $\pm$ 2.466a**	67.26 $\pm$ 1.827b**
	1311	80.49 $\pm$ 1.544ab*	76.00 $\pm$ 3.281a*	72.19 $\pm$ 2.251a*	64.44 $\pm$ 0.403b**
	1967	83.71 $\pm$ 2.621a*	79.43 $\pm$ 2.169a***	71.93 $\pm$ 3.175a	69.58 $\pm$ 1.700ab**
	2622	81.19 $\pm$ 2.585ab***	78.84 $\pm$ 1.741a*	71.21 $\pm$ 2.497a***	69.88 $\pm$ 1.949ab**
	3278	83.58 $\pm$ 1.255ab*	78.26 $\pm$ 2.170a***	70.42 $\pm$ 2.970a**	73.43 $\pm$ 1.024ab***
	3934	85.48 $\pm$ 0.949a*	78.71 $\pm$ 2.563a*	69.23 $\pm$ 1.566a**	65.30 $\pm$ 2.814b**

<sup>1</sup> Waarden gevolgd door een verschillende letter of een verschillend aantal asterixen zijn significant verschillend volgens Tukey HSD of Bonferroni test op het 5 % significantieniveau. Bij de letters enkel vergelijking binnen eenzelfde bestrijdingsinterval en plantensoort en bij de asterixen enkel vergelijking binnen eenzelfde cumulatieve energiedosis en plantensoort.

#### 4.2.2. Discussie

Bij alle soorten wordt de maximale reductie in bedekking bereikt door het laagste bestrijdingsinterval van 2 weken bij toepassing van de hoogste cumulatieve energiedosis (3934 kJ/m<sup>2</sup>). Dit is in overeenstemming met de bevindingen van Boonen *et al.* (2013) die de hoogste beeldscores ( zie 2.1.1, Tabel 3 bekomen bij toepassing van een grotere bestrijdingsfrequentie of aanhouden van een korter bestrijdingsinterval.

Een bestrijdingsinterval van 6 weken resulteert bij alle geteste soorten doorgaans in de laagste reductie in totale droge biomassa, onafhankelijk van de ingezette cumulatieve energiedosis. Enkel bij paardenbloem zorgt het bestrijdingsinterval van 2 weken bij de hogere cumulatieve energiedosis (2622, 3278 en 3934 kJ/m<sup>2</sup>) voor de laagste reductie in totale droge biomassa. Kortere bestrijdingsintervallen resulteren doorgaans in grotere reducties die telkens het grootst zijn bij de hoogste cumulatieve energiedosis (3934 kJ/m<sup>2</sup>). Bij deze cumulatieve energiedosis zorgt het bestrijdingsinterval van 2 weken bij grote weegbree en het bestrijdingsinterval van 3 weken bij Engels raaigras en paardenbloem voor de hoogste reductie in totale droge biomassa van respectievelijk 89, 73

en 69% t.o.v. de onbehandelde controle. Kortere bestrijdingsintervallen zorgen voor een grotere uitputting van de totale biomassa doordat de planten minder tijd krijgen om opnieuw bovengrondse plantendelen te vormen (noodzakelijk om aan fotosynthese te kunnen doen en zo suikers te vormen) en vervolgens nieuwgevormde suikers op te slaan in ondergrondse biomassa (Boonen, *et al.* (2013)). Hierdoor kunnen de planten hun negatieve energiebalans gecreëerd kort na een heetwaterbehandeling niet ombuigen en put hun C-sinks verder uit door het aanspreken voor hergroei.

Het effect van het bestrijdingsinterval op de verdeling van de totale droge biomassa in de boven- en ondergrondse fractie is sterk soortafhankelijk. Bij paardenbloem heeft het bestrijdingsinterval geen effect op de fractie ondergrondse droge biomassa. Bij grote weegbree resulteert een afnemend bestrijdingsinterval meestal in een stijgende fractie ondergrondse droge biomassa, dit in tegenstelling tot Engels raaigras waarbij de fractie ondergrondse droge biomassa toeneemt met een afnemend bestrijdingsinterval. De soortafhankelijkheid van de verdeling van de totale droge biomassa in boven- en ondergrondse fractie is wellicht grotendeels te wijten aan de heetwatergevoeligheid van de bovengrondse plantendelen en de mate van hergroei na behandeling. Grote weegbree kent een sterke reductie in de levende bovengrondse biomassa, onafgezien van de cumulatieve energiedosis dit in tegenstelling tot het minder gevoelig Engels raaigras waarbij telkens een grote fractie bovengrondse biomassa niet gedood wordt na behandeling. Paardenbloem en grote weegbree vertonen een eerder sterke hergroei van bovengrondse plantendelen na een heetwaterbehandeling, in tegenstelling tot Engels raaigras waar de hergroei van bovengrondse plantendelen eerder beperkt is na een heetwaterbehandeling.

Voor een eco-efficiënte en effectieve bestrijding in termen van biomassareductie opteert men bij paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras best voor een 3-wekelijkse bestrijding. Bij dit bestrijdingsinterval worden de laagste (weliswaar niet altijd significant verschillend met andere bestrijdingsintervallen) ED<sub>50</sub>- en ED<sub>70</sub>-waarden bekomen. Om een effectieve en eco-efficiënte bestrijding te bekomen is het bij de onderzochte soorten aangeraden deze 3-wekelijkse behandeling bij een energiedosis van 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling (overeenstemmend met een cumulatieve energiedosis van 3278 kJ/m<sup>2</sup>) uit te voeren. Deze dosis zorgt bij de onderzochte soorten voor een reductie in totale droge biomassa van ongeveer 70% t.o.v. de onbehandelde controle (zie Tabel 25 en berekende ED<sub>70</sub>-waarden in Tabel 24). Bij grote weegbree zorgt een 2-wekelijkse behandeling bij een cumulatieve energiedosis van 3934 kJ/m<sup>2</sup> zelfs voor een nog effectievere (89% reductie t.o.v. controle) en eco-efficiëntere bestrijding, maar deze reductie verschilt niet significant van de reductie bij een bestrijdingsinterval van 3 weken (zie Tabel 25). In de praktijk wordt de keuze van het bestrijdingsinterval bij onkruidbestrijding echter vaak sterker bepaald door praktische en economische aspecten, dan eco-efficiëntie en mate van uitputting van de onkruiden. Bij een heetwaterbestrijding maakt de arbeidskost 25%, het brandstofverbruik (om het water op te warmen en van de werktuigdrager) bedraagt 40% en de afschrijving van de machine 25% van de totale kostprijs per behandeling uit. . Louter kostprijsgewijs geredeneerd, is het bij gelijkblijvende cumulatieve energiedosis, interessanter om om de 4- of 6-weken te behandelen dan om de 3 weken: 4- of 6-wekelijks behandelen reduceert de jaarlijkse kostprijs van behandelen immers met respectievelijk ongeveer 25% en 50% in vergelijking met 3-wekelijks behandelen. Bovendien moet je met een wijder bestrijdingsinterval minder frequent parkeerverbod opleggen om heetwatertoepassing toe te laten. Het blijft maar de vraag of de behandelingskost op

langere termijn niet zal toenemen wanneer suboptimale bestrijdingsintervallen worden toegepast. Binnen optimale bestrijdingsintervallen is het vanuit economisch en praktisch standpunt steeds aangewezen te kiezen voor het widest interval.

Geen enkele geteste meerjarige plantensoort wordt in een termijn van 12 weken volledige uitgeput. Op het einde van de bestrijdingsperiode van 12 weken blijft bij paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras, bij toepassing van de aanbevolen 3-wekelijkse behandeling met 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling, nog ongeveer 30% (t.o.v. de onbehandelde controle) aan levende bovengrondse en ondergrondse biomassa over. Het is bijgevolg raadzaam om de aanbevolen 3-wekelijkse heetwaterbehandelingen met een energiedosis van 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling ook in volgende groeiseizoenen aan te houden om een verder uitputting van deze meerjarige onkruiden te bewerkstelligen. Hierbij dienen de behandelingen in het voorjaar hernomen te worden van zodra de onkruiden duidelijke hergroei vertonen dit om te voorkomen dat onkruiden hun C-sinks terug aanvullen.

## 4.3. Experiment 3

### 4.3.1. Resultaten

Figuur 29 toont per soort de bekomen dosis-respons curves van de bedekking 7 dagen na behandelen i.f.v. de energiedosis voor de ochtend-, middag- en avondbehandeling met heet water. De bijhorende ED-waarden en significante verschillen zijn samengevat in tabel 27.

Bij *paardenbloem* zijn zowel de ED<sub>50</sub>- als de ED<sub>90</sub>-waarden het laagst bij de avondbehandeling (12u na zonsopkomst), m.a.w. de planten zijn tijdens de avond het gevoeligst ten aanzien van heet water. In vergelijking met de ochtendbehandeling (2u na zonsopkomst) zijn de ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden van een avondbehandeling respectievelijk 2 en 2.5 keer lager. De ED-waarden voor de middagbehandeling zijn intermediair.

Bij *gewone hoornbloem* zijn zowel de ED<sub>50</sub>- als de ED<sub>90</sub>-waarden het laagst bij de middagbehandeling. De ED-waarden van de avondbehandeling zijn iets hoger, maar niet significant verschillend van de ED-waarden van de middagbehandeling. De ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden van een avond- en middagbehandeling zijn tot 2 keer lager dan de ED-waarden bij een ochtendbehandeling.

Engels raaigras vertoont een significante dagvariatie in gevoeligheid op ED<sub>50</sub>-niveau maar niet op het ED<sub>90</sub>-niveau. De ED<sub>50</sub>-waarde van een avondbehandeling is 2 keer lager dan die van een ochtendbehandeling. De ED<sub>50</sub>-waarde van de middagbehandeling is intermediair.

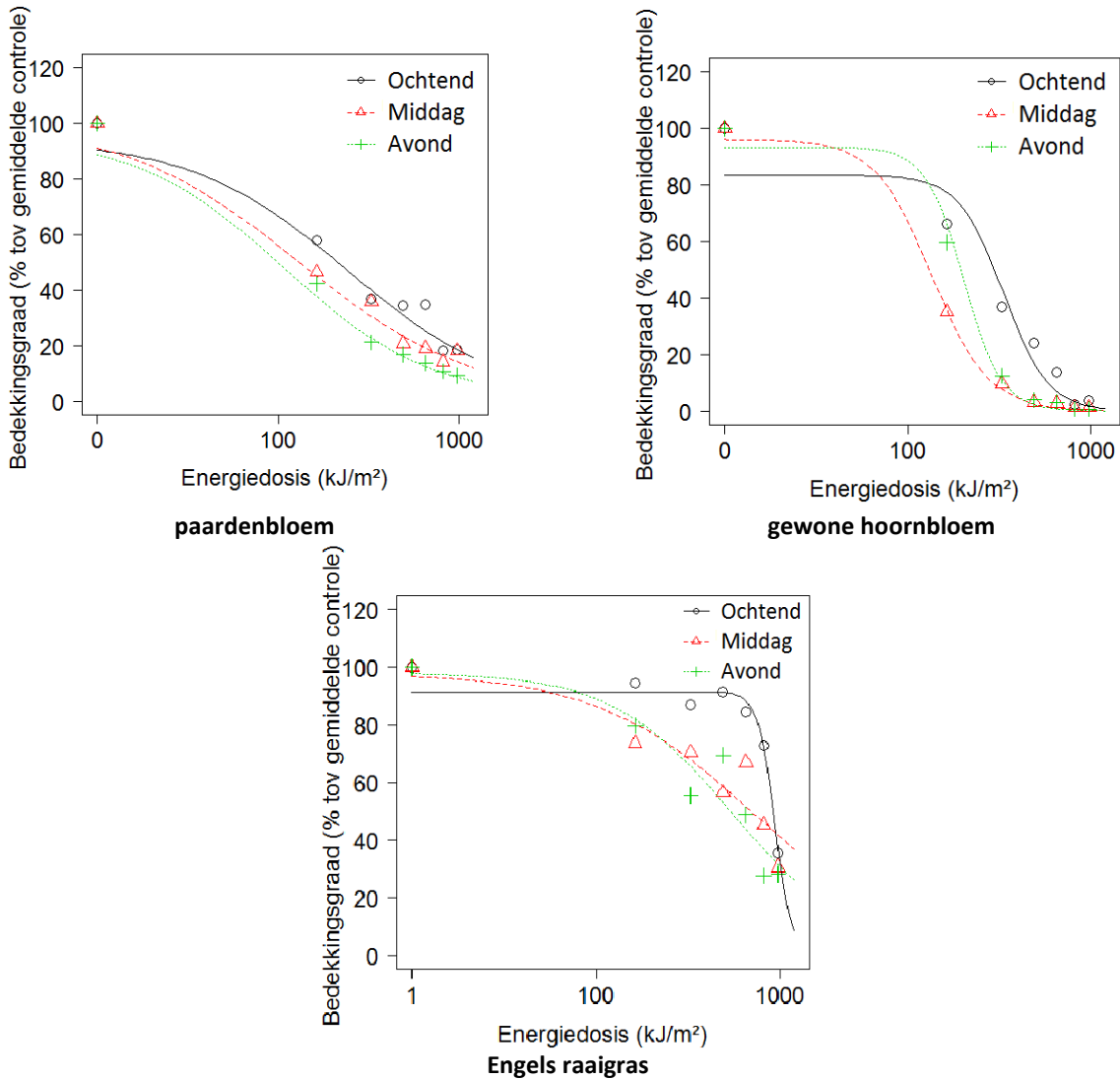
In Tabel 28 staan de resultaten van de analyse van de **bovengrondse droge biomassa** weergegeven. Net als bij de resultaten van experiment 1 (zie 4.1.1) is hier 25 dagen na behandeling nog steeds het effect van de toegepaste energiedosis merkbaar. Ook het effect van het tijdstip van behandelen gedurende de dag is nog steeds, met enkele afwijkingen, merkbaar. Bij de hoogst toegepaste dosis (983 kJ/m<sup>2</sup>) is er bij de 3 soorten geen significante dagvariatie in gevoeligheid meer merkbaar.

Bij *paardenbloem* resulteert de middagbehandeling in tegenstelling tot bij de bedekking, op lange termijn voor de grootste reductie in biomassa. De avondbehandeling zorgt meestal voor een intermediaire en de ochtendbehandeling voor de laagste reductie.

Bij *gewone hoornbloem* zorgt de middagbehandeling, net als bij de bedekking, voor de grootste reductie in biomassa. Net als bij de bedekking zorgt de avondbehandeling voor een intermediaire en de ochtendbehandeling voor de laagste reductie.

Bij *Engels raaigras* vertoont de bovengrondse droge biomassa net als bij de bedekking geen significante dagvariatie in gevoeligheid.

In Figuur 30 wordt de dagvariatie in gevoeligheid van paardenbloem, gewone hoornbloem en Engels raaigras weergegeven.



**Figuur 29. Dosis-respons curves voor drie plantensoorten behandeld met heet water van 98°C tijdens de ochtend (2u na zonsopkomst), middag (7u na zonsopkomst) of avond (12u na zonsopkomst) (respons = de bedekkingsgraad 7d na behandeling).**

**Tabel 27. ED<sub>50</sub>- en ED<sub>90</sub>-waarden (kJ/m<sup>2</sup>) met SE voor drie plantensoorten behandeld met heet water van 98°C tijdens de ochtend, middag en avond.**

soort	behandelingstijdstip*	ED <sub>50</sub>	ED <sub>90</sub>
paardenbloem	ochtend	242.6±73.89a	2152.6±497.06a
	middag	129.9±43.73ab	1521.4±323.41a
	avond	108.0±29.99b	868.4±131.72b
gewone hoornbloem	ochtend	334.4±70.15a	621.3±62.94a
	middag	135.4±28.65b	297.7±41.38b
	avond	202.1±38.00b	342.2±41.71b
Engels raaigras	ochtend	938.4±39.03a	1188.5±146.70a
	middag	724.6±209.11ab	6369.7±6383.27a
	avond	553.1±112.56b	2942.6±1354.69a

Niet significante verschillen (gebaseerd op de selectiviteitsindices en bijhorende p-waarden) hebben dezelfde letter. Enkel vergelijking binnen eenzelfde soort en effectieve dosis.

\* ochtend: 8u (2u na zonsopkomst), middag: 13u (7u na zonsopkomst), avond: 18u (12u na zonsopkomst)

**Tabel 28. Bovengrondse droge biomassa (g/pot) per plantensoort in functie van behandelingstijdstip en toegepaste energiedosis.**

soort	energiedosis (kJ/m <sup>2</sup> )	behandelingstijdstip <sup>1,*</sup>		
		ochtend	middag	avond
paardenbloem	0	0.95±0.077a*	0.95±0.077a*	0.95±0.077a*
	164	0.61±0.046ab*	0.39±0.035b**	0.53±0.061ab***
	328	0.52±0.033b*	0.27±0.012bc**	0.43±0.038bc*
	492	0.48±0.044bc*	0.24±0.027c**	0.36±0.045bcd***
	656	0.47±0.082bcd*	0.26±0.025bc**	0.32±0.028cde***
	819	0.30±0.052cd*	0.19±0.023c*	0.23±0.018de*
	983	0.25±0.017d*	0.19±0.017c*	0.22±0.029e*
gewone hoornbloem	0	0.72±0.045a*	0.72±0.045a*	0.72±0.045a*
	164	0.58±0.058ab*	0.32±0.064b**	0.37±0.029b**
	328	0.35±0.068bc*	0.15±0.043b**	0.20±0.038bc***
	492	0.36±0.050bc*	0.01±0.007c**	0.10±0.052cd**
	656	0.19±0.034c*	0.03±0.024c**	0.05±0.021de**
	819	0.01±0.007d*	0.00±0.002c*	0.00±0.000e*
	983	0.01±0.005d*	0.00±0.000c*	0.00±0.000e*
Engels raaigras	0	1.61±0.091a*	1.61±0.091a*	1.61±0.091a*
	164	1.74±0.122a*	1.31±0.131ab*	1.79±0.186a*
	328	1.53±0.159a*	1.26±0.207ab*	1.35±0.264ab*
	492	1.72±0.084a*	1.13±0.092ab**	1.42±0.170ab***
	656	1.58±0.168a*	1.31±0.090ab*	1.20±0.062ab*
	819	1.55±0.123a*	1.17±0.141ab***	0.92±0.060b**
	983	0.79±0.078b*	0.84±0.100b*	0.99±0.091b*

<sup>1</sup> Biomassa-waarden met eenzelfde letter zijn niet significant verschillend van elkaar volgens de Tukey HSD test (in geval van homoscedasticiteit) of de Bonferroni test (in geval geen homoscedasticiteit) op het 5% significantieniveau; enkel vergelijking binnen eenzelfde behandelingstijdstip en plantensoort.

\* ochtend: 8u (2u na zonsopkomst), middag: 13u (7u na zonsopkomst), avond: 18u (12u na zonsopkomst)





paardenbloem



gewone hoornbloem



Engels raaigras

Figuur 30. Dagvariatie in gevoeligheid (van boven naar onder: avond (12u na zonsopkomst), middag (7u na zonsopkomst), ochtend(2u na zonsopkomst)) op bedekking 7 dagen na behandeling met heet water (98°C) voor de aangeduide soorten bij toepassen van verschillende energiedosissen (v.l.n.r. 0, 164, 328, 492, 656, 819 en 983 (kJ/m<sup>2</sup>)) op planten van 46d oud.

### 4.3.2. Discussie

De geteste plantensoorten vertonen zowel bij de bedekking (7 dagen na behandeling) als bij de bovengrondse droge biomassa (25 dagen na behandeling) een duidelijk dagpatroon in gevoeligheid ten aanzien van heet water.

De gevoeligheid op ED<sub>50</sub> niveau, in termen van reductie in bedekking, is bij alle soorten het laagst in de ochtend (2u na zonsopkomst) en piekt vervolgens naar de middag (7u na zonsopkomst)(gewone hoornbloem) en/of avond (12u na zonsopkomst) (paardenbloem en Engels raaigras). De gevoeligheid op ED<sub>90</sub>-niveau is vergelijkbaar, behalve voor Engels raaigras waarvoor geen significante dagvariatie in ED<sub>90</sub> is vastgesteld. De gevoeligheid van paardenbloem en gewone hoornbloem, in termen van biomassareductie, is het hoogst gedurende de middag (7u na zonsopkomst) en het laagst gedurende de ochtend. Engels raaigras vertoont net als voor de bedekking geen significante dagvariatie in gevoeligheid.

Bovenstaand dagverloop in de gevoeligheid van plantensoorten ten aanzien van heet water bevestigen de bevindingen van Ulloa *et al.* (2012). Ulloa *et al.* (2012) constateerden dat de gevoeligheid van maïs (*Zea mays* L.), sojaboon (*Glycine max* (L.) Merr.), fluweelblad (*Abutilon theophrasti* Medik.) en groene naalbaar (*Setaria viridis* (L.) P. Beauv) ten aanzien van branden significant hoger was vanaf 8u na zonsopkomst (5u50) (in vergelijking met de gevoeligheid tijdens de ochtend (0u na zonsopkomst)) en maximaal was tijdens de avond (12u na zonsopkomst).

Een mogelijke verklaring voor de variatie in gevoeligheid gedurende de dag is de variatie in relatieve waterinhoud van de planten gedurende de dag (Ulloa *et al.*, 2012). De relatieve waterinhoud van planten daalt namelijk naar de middag (8u na zonsopkomst) toe, doordat de planten gedurende de ochtend minder water kunnen opnemen via hun wortels dan ze verliezen door transpiratie. Naar de avond (12u na zonsopkomst) toe stijgt deze relatieve waterinhoud wel terug, doordat de wateropname dan wel het waterverlies kan compenseren (Steppe, 2011; Ulloa *et al.*, 2012). Het lijkt er dan ook op te wijzen dat de planten het gevoeligst zijn wanneer hun relatieve waterinhoud het laagst is en de planten als het ware de grootste waterstress ondergaan (Ulloa *et al.*, 2012). De dagvariatie in gevoeligheid t.a.v. heet water kan echter niet altijd volledig via de dagvariatie in relatieve waterinhoud verklaard worden. In tegenstelling tot het patroon van de relatieve waterinhoud neemt de gevoeligheid van paardenbloem en Engels raaigras t.a.v. heet water gestaag toe tot minstens 12u na zonsopkomst.

De afwezigheid van een dagpatroon in gevoeligheid (behalve bij de ED<sub>50</sub>-waarden) bij Engels raaigras is mogelijk te wijten aan de lagere gevoeligheid van Engels raaigras voor heet water (zie 4.1.1). Hierdoor is bij de berekening van de ED<sub>90</sub>-waarden een grote extrapolatie nodig, wat zorgt voor grotere standaardfouten. Mogelijk kent Engels raaigras in vergelijking met andere soorten evenwel een veel beperktere dagvariatie in relatieve waterinhoud.

## 5. Besluit

### **Welke heetwatertemperatuur is effectiefst? (D1)**

Dosis-responsproeven tonen aan dat een heetwaterbehandeling met een hoge watertemperatuur de beste garantie biedt op een effectieve onkruidbestrijding. Zo zorgt een heetwatertemperatuur van 98°C bij het jongste ontwikkelingsstadium (39 dagen oud) steeds voor de hoogste effectiviteit. Bij het oudste ontwikkelingsstadium (81 dagen oud) is er niet altijd een verschil in effectiviteit tussen de verschillende watertemperaturen (98, 88 en 78°C), maar indien er een verschil is, zorgt de hoogste watertemperatuur steeds voor de effectiefste heetwaterbestrijding van onkruiden. Door onkruiden te behandelen met water van 98°C kan het energieverbruik met een factor 2 tot 6 bij behandeling van het jongste groeistadium en een factor 2 tot 3 bij behandeling van het oudste ontwikkelingsstadium verlaagd worden om hetzelfde bestrijdingseffect (50 tot 90% reductie) te bekomen als bij toepassing van water van 78 of 88°C.

### **Welk ontwikkelingsstadium is het gevoeligst ten aanzien van heet water? (D2)**

De dosis-responsproeven tonen aan dat, indien er een verschil in gevoeligheid was tussen de ontwikkelingsstadia (39, 60 en 81 dagen oude planten), het jongste ontwikkelingsstadium (39d oud) steeds het gevoeligst is. Zo is het jongste ontwikkelingsstadium bij behandeling met water van 98 °C van Canadese fijnstraal, gewone hoornbloem en paardenbloem, bij een reductie van 50% in bedekking, dubbel tot vier keer zo gevoelig als het oudste ontwikkelingsstadium (81d oud). Bij Engels raaigras, grote weegbree en straatgras verschillen de ontwikkelingsstadia niet significant in gevoeligheid. Vermits een jonger stadium doorgaans gevoeliger is, is het om redenen van effectiviteit en eco-efficiëntie raadzaam onkruiden in een jong groeistadium (39 dagen of jonger) te behandelen.

### **Zijn er interspecifieke verschillen in gevoeligheid ten aanzien van heet water? (D3)**

De resultaten tonen duidelijk aan dat soorten verschillen in gevoeligheid t.a.v. heet water. Canadese fijnstraal en paardenbloem zijn zowel in het jongste als oudste ontwikkelingsstadium de gevoeligste soorten. Tot de intermediair gevoelige soorten behoren gewone hoornbloem, grote weegbree en witte klaver. De ongevoeligste soorten zijn Engels raaigras en straatgras. De gevoeligste soorten zijn tot drie keer gevoeliger dan de ongevoelige soorten. Deze gevoeligheid houdt enkel rekening met de kortetermijnrespons (eenmalige behandeling) van de bovengrondse plantendelen op een heetwaterbehandeling en zegt niets over de mogelijkheden tot hergroei, na herhaaldelijk behandelen (zie onderzoeksvraag D5 t.e.m. D7). De verschillen in gevoeligheid zijn wellicht te wijten aan de morfologische en fysiologische kenmerken van de soorten. Zo bezitten de gevoeligste soorten grote contactoppervlakken en/of horizontaal georiënteerde, dunne bladeren. Deze kenmerken zijn gunstig voor een effectieve warmteoverdracht. Grassen daarentegen vertonen smalle bladeren en een erecte bladstand. Deze kenmerken verlagen de warmteoverdracht tussen het water en de plant in sterke mate. De energiedosis dient bijgevolg gekozen te worden in functie van de aanwezige flora op een verharding.

#### **Heeft de toegepaste energiedosis 4 weken na behandelen nog een effect op de biomassa van onkruiden? (D4)**

Op basis van dosis-responsproeven en vergelijking van gemiddelden van de bovengrondse droge biomassa is er 4 weken na behandeling nog duidelijk een effect van de toegepaste dosis op de biomassa te merken. Een stijgende energiedosis per behandeling zorgt nog steeds voor een toenemende reductie in biomassa. Ook de hogere effectiviteit bij toepassing van een hogere watertemperatuur en de interspecifieke verschillen in gevoeligheid t.a.v. heet water blijven 4 weken na behandeling merkbaar.

#### **Welk bestrijdingsinterval zorgt voor de grootste reductie in biomassa? (D5)**

De bedekking door levende bovengrondse biomassa van paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras wordt maximaal gereduceerd door de onkruiden 2-wekelijks te behandelen. Hierbij is echter niet aangetoond of een ander bestrijdingsinterval een significant verschil in bedekking oplevert.

Bij grote weegbree, paardenbloem en Engels raaigras resulteert het bestrijdingsinterval van 2, 3 en 3 weken bij toepassing van respectievelijk 983, 819 en 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling voor de grootste reductie (respectievelijk 89, 69 en 73% t.o.v. de onbehandelde controle) in totale droge biomassa, na 12 weken behandelen. Afhankelijk van de soort is er echter niet altijd een groot verschil tussen de bestrijdingsintervallen van 2, 3 of 4 weken. Zo zorgt bij grote weegbree het bestrijdingsinterval van 3 weken in vergelijking met een interval van 2 weken voor een iets lagere, maar niet significant verschillende reductie t.o.v. de controle.

#### **Met welk bestrijdingsinterval en welke energiedosis is de heetwatertechnologie effectief en eco-efficiënt? (D6)**

Voor een effectieve (d.w.z. 70% reductie in totale droge biomassa na 12 weken behandelen) en eco-efficiënte bestrijding, opteert men bij paardenbloem, grote weegbree en Engels raaigras best voor een driewekelijkse bestrijding aan 819 kJ/m<sup>2</sup> per beurt (berekend op basis van de waarden in Tabel 25 en overeenstemmend met de ED<sub>70</sub>-waarden in Tabel 24). Bij grote weegbree zorgt een bestrijdingsinterval van 2 weken en een dosis van 656 kJ/m<sup>2</sup> per beurt voor een nog hogere effectiviteit (89% reductie t.o.v. controle) en eco-efficiëntie. Omwille van de hoge arbeidskosten en praktische belemmeringen (bv. instellen van parkeerverbod), zal het 2-wekelijks behandelen vermoedelijk nauwelijks toegepast worden in de praktijk.

#### **Kunnen onkruiden volledig gedood worden via herhaaldelijk behandelen? (D7)**

Via herhaaldelijk behandelen gedurende een periode van 12 weken kan met de geteste cumulatieve energiedosissen (0 tot 3934 kJ/m<sup>2</sup>) geen volledige doding van grote weegbree, paardenbloem of Engels raaigras van 86 dagen oud bekomen worden. Gedurende de proefperiode van 12 weken wordt de totale droge biomassa, bij toepassing van het aanbevolen 3-wekelijks behandeling met 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling, tot ongeveer 30% t.o.v. de onbehandelde controle gereduceerd. Wil men deze meerjarige onkruiden verder uitputten dan zal ook in het daaropvolgend groeiseizoen een strak behandelingsregime uitgevoerd moeten worden. Een tijdige start van de vervolghandelingen in het voorjaar en het aanhouden van een bestrijdingsinterval van 3 weken is hierbij aanbevolen.

### **Wanneer op de dag zijn planten het gevoeligst voor een heetwaterbestrijding? (D8)**

Paardenbloem, gewone hoornbloem en Engels raaigras van 46 dagen oud vertonen een duidelijk patroon in gevoeligheid gedurende de dag. Deze soorten zijn, in de periode van 2 tot 12u na zonsopkomst, het minst gevoelig in de ochtend (2u na zonsopkomst). Naar de middag (7u na zonsopkomst) toe worden de planten gevoeliger. Bij gewone hoornbloem zijn de planten het gevoeligst gedurende de middag (7u na zonsopkomst), terwijl bij paardenbloem en Engels raaigras de gevoeligheid verder stijgt tussen de middag en avond, om een maximale gevoeligheid, binnen het bereik van de metingen, te bereiken gedurende de avond (12u na zonsopkomst). De planten zijn op hun maximale gevoeligheid ongeveer dubbel zo gevoelig als gedurende de ochtend. Om een effectieve en eco-efficiënte bestrijding uit te voeren dienen de onkruiden dus best pas vanaf de middag (vanaf 7u na zonsopkomst) bestreden te worden. In de praktijk is het echter niet altijd mogelijk alle verhardingen enkel gedurende de middag te bestrijden, in dat geval dienen bij voorkeur de verhardingen met grote bedekkingen aan weinig heetwatergevoelige plantensoorten (bv. grassen) vanaf de middag (7 tot 12u na zonsopkomst) behandeld te worden.

Om een effectieve en eco-efficiënte bestrijding van onkruiden op verhardingen met heet water te bekomen is het dus aanbevolen om onkruiden in een zo jong mogelijk ontwikkelingsstadium met heet water van 98°C na de middag (7 tot 12u na zonsopkomst) 3-wekelijks te behandelen met een energiedosis van 819 kJ/m<sup>2</sup> per behandeling.

## 6. Verder onderzoek

Deze masterproef is erin geslaagd om bepaalde veronderstellingen en trends uit eerdere onderzoeken te onderbouwen of te bevestigen. Hierna volgen enkele aanbevelingen voor verder onderzoek.

1) De dosis-respons proeven uitvoeren bij een grotere range van energiedosissen. Uit de resultaten van experiment 1 is duidelijk dat de bekomen  $ED_{90}$ -waarden voor sommige soorten (bv. Engels raaigras) ver boven de maximale toegepaste energiedosis ( $983 \text{ kJ/m}^2$ ) liggen. Bij verdere proeven dient bij voorkeur energiedosissen van 0 t.e.m.  $4000 \text{ kJ/m}^2$  toegepast te worden om zo een veel betrouwbaardere berekening van de  $ED_{90}$ -waarden te bekomen voor deze weinig gevoelige soorten.

2) Om het gevoeligste ontwikkelingsstadium te bepalen dienen er proeven uitgevoerd te worden met planten die 7, 14, 21, 28 en 35 dagen oud zijn. Via deze reeks kan bepaald worden op welk moment de omschakeling in ongevoeliger worden, plaatsvindt en in welke mate deze ontwikkelingsstadia verschillen in gevoeligheid. Idealiter dient er best een proef opgezet te worden in het voorjaar, in de zomer en in het najaar om te bepalen of er ook een effect is van het seizoen op de verschillen in gevoeligheid tussen de ontwikkelingsstadia.

3) Om interspecifieke verschillen en de dagvariatie in gevoeligheid t.a.v. heet water te verklaren is het interessant om naast de morfologische kenmerken, ook fysiologische kenmerken (bv. relatieve waterinhoud op moment van behandeling) te bepalen op moment van behandeling.

4) Om aanbevelingen te over de effectiefste en eco-efficiëntste combinatie van bestrijdingsinterval en toe te passen energiedosis is het interessant om deze proeven over verschillende jaren uit te voeren en eventueel uit te breiden naar andere soorten. Zo kan voor diverse plantensoorten geëvalueerd worden hoe het effect van de behandelingen op biomassareductie zich doorheen de verschillende seizoenen doorzet.

5) Naast het bepalen of de behandelingen (éénmalige of herhaaldelijke behandeling) relatief t.o.v. de controle een reductie in biomassa veroorzaken is het interessant om ook de absolute reductie in biomassa van onkruiden, namelijk de reductie t.o.v. onbehandelde planten in het begin van het groeiseizoen, bepalen.

6) In deze masterproef werd de bedekking door niet-groene levende plantendelen manueel bepaald. Om een meer geautomatiseerde bepaling van de bedekking met ImageJ software uit te kunnen voeren is het aangewezen om enerzijds met zwarte in plaats van bruinrode potjes te werken en anderzijds te werken met een uniform zwarte achtergrond bij het nemen van de foto's.

## 7. Referentielijst

- AMINAL (2002) 'Beheer van kruidgroei op verhardingen Spoor 4', p. 1-73.
- Ascard, J. (1995) 'Thermal weed control by flaming: biological and technical aspects', *Swedish University of Agricultural Engineering*, p. 1-61.
- Beeldens, A. & Boonen, E. (2011) 'Preventief onkruidbeheer op verhardingen', *Bijlage bij OCW Mededelingen 86, Dossier 10*, p. 1-24.
- Beeldens, A., Gendera, F., Rens, L., Van den Berghe, T., Van den Heyning, G. & Vijverman, L. (2008) 'Waterdoorlatende verhardingen met betonstraatstenen', *OCW Mededelingen 77, Dossier 5*, p. 1-20.
- Benvenuti, S. (2004) 'Weed dynamics in the Mediterrean urban ecosystem: ecology, biodiversity and management', *Weed Research*, vol. 44, p. 341-354.
- Boonen, E., Beeldens, A., De Cauwer, B., Fagot, M. & Reheul, D. (2013) 'Handleiding voor niet-chemisch(e) onkruidbeheer(sing) op verhardingen met kleinschalige elementen', *OCW Aanbevelinge, A84/12*, p. 1-114.
- Brattebo, B.O. & Booth, D.B. (2003) 'Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems', *Water Research 37*, p. 4369-4376.
- Claeys, S., Steurbaut, W., Theuns, I., De Cooman, W., De Wulf, E., Eppinger, R., D'hont, D., Dierckxens, C., Goemans, G., Belpaire, C., Wustenberghs, H., den Hond, E., Peeters, B. & Overloop, S. (2007) 'Milieurapport Vlaanderen (MIRA) Achtergronddocument, Thema Verspreiding van bestrijdingsmiddelen', p. 1-112.
- Claeys, S., Vagenende, B., De Smet, B., Lelieur, L. & Steurbaut, W. (2005) 'The Pocer indicator: a decision tool for non-agricultural pesticide use', *Pest Management Science 61*, p. 779-786.
- Collins, M. (1999) 'Thermal weed control, a technology with a future?', *Twelfth Australian Weeds Conference*, p. 4.
- Costea, M. & Tardif, F.J. (2005) 'The biology of Canadian weeds. 131. Polygonum aviculare L.', *Canadian Journal of Plant Science 85*, p. 481-506.
- D'amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., Liccardi, G., Popov, T. & van Cauwenberge, P. (2007) 'Allergenic pollen and pollen allergy in Europe', *Allergy 62*, p. 976-990.
- De Cauwer, B. (2011) 'Onkruidbestrijding op halfopen verhardingen - Efficiëntie en milieu-impact', *Groencontact 37*, p. 16-21.
- De Cauwer, B. (2013a) 'Cursus toegepaste herbologie, hoofdstuk: Beheersing kruidachtige overblijvende onkruiden', *Universiteit Gent, faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep plantaardige productie*, p. 1-16.
- De Cauwer, B. (2013b) 'Niet-chemische onkruidbestrijdingstechnieken: effectiviteit en milieueffecten', *Universiteit Gent, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Vakgroep Plantaardige Productie. Studiedag Leuven, presentatie*.

- De Cauwer, B. (2013c) 'Foto's verkregen via dr. ir. B De Cauwer'
- De Cauwer, B. & Bulcke, R. (2011) 'Cursus herbologie, hoofdstuk: Verhardingen', *Universiteit Gent, faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep plantaardige productie*, p. 5-26.
- Delarue, S. & Willem, J. (2006) 'Mechanisatie van het landschapsbeheer - Werktuigen voor het beheer van opgaande kleine landschapselementen, (oever)bermen en recreatiepaden', *Innovatie- en Kenniscentrum (IKC), Groenmanagement (KATHO-HIVB)*, p. 1-92.
- DOB (2008) 'Preventiedocument', p. 8.
- DOB (2010a) 'Definities & Toelichtingen', *Certificatieschema Barometer Duurzaam terreinbeheer*, p. 5.
- DOB (2010b) 'DOB Shortlist 0. Uitgangspunten en Meerjarenplanning Duurzaam OnkruidBeheer verhardingen (DOB).', *Plant Research International B.V. Wageningen UR.*, p. 1.
- DOB (2013a) 'DOB 2.0 Shortlist 1: richtlijnen voor tactische planning (jaarplanning) onkruidbeheer verhardingen.', *Plant Research International B.V. Wageningen UR.*
- DOB (2013b) 'DOB 2.0 Shortlist 2: Inzet van bestrijdingsmiddelen op de plaatsen waar dit volgens DOB 2.0 Shortlist 1 is toegestaan.', *Plant Research International B.V. Wageningen UR.*
- Dulevo (2012) *Dulevo 850 Mini*, [Online], Available: <http://dulevointernational.com/machines/industrial-street-cleaning-sweeper-dulevo-850-mini.php> [7 Dec 2012].
- Fagot, M., De Cauwer, B., Beeldens, A., Boonen, E., Bulcke, R. & Reheul, D. (2011) 'Weed flora in paved areas in relation to environment, pavement characteristics and weed control', *Weed Research*.
- Giesy, J.P., Dobson, S. & Solomon, K.R. (2000) 'Ecotoxicological Risk Assessment for Roundup(R) Herbicide', *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 167, p. 35-120.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J. & van Zelm, R. (2013) 'ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprise harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (revised)', *Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer*, p. 1-126.
- Grilli Caiola, M., Mazzietti, A., Capucci, E. & Travaglini, A. (2002) 'Monitoring pollinosis and airborne pollen in a Rome university', *Aerobiologia* 18, p. 267-275.
- Hansson, D. & Ascard, J. (2002) 'Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control', *Weed Research* 42, p. 307-316.
- Hansson, D. & Mattsson, J.E. (2002) 'Effect of drop size, water flow, wetting agent and water temperature on hot-water weed control', *Crop Protection* 21, p. 773-781.
- Hansson, D. & Mattsson, J.E. (2003) 'Effect of air temperature, rain and drought on hot water weed control', *Weed Research* 43, p. 245-251.
- Harlan, J.R. & de Wet, J.M. (1965) 'Some Thoughts About Weeds', *Economic Botany*, p. 16-24.
- Jonkers, N. (2012) 'LCA-quickscan vergelijking onkruidbestrijdingsmethoden', *Plant Research International B.V. Wageningen UR.*, p. 1-27.



- Kempenaar, C., Lotz, L.A.P., Riemens, M.M. & Knol, J. (2006) 'Sustainable weed management on concrete block pavement', *8th International Conference on Concrete Block Paving*, p. 295-302.
- Kempenaar, C. & Spijker, J.H. (2004) 'Weed control on hard surfaces in The Netherlands', *Pest Management Science* 60, p. 595-599.
- Kempenaar, C. & van Dijk, C. (2006) 'De DOB Methode, Naar duurzamer onkruidbeheer op verhardingen (Publieksrapport).', *Plant Research International B.V. Wageningen UR.*, p. 1-11.
- Knezevic, S.Z., Streibig, J.C. & Ritz, C. (2007) 'Utilizing R Software Package for DOse-Response Studies: The Concept and Data Analysis', *Weed Technology*, p. 840-848.
- Kortenhoff, A., Kempenaar, C., Lotz, L.A.P., Beltman, W. & den Boer, L. (2001) 'Rational Weed Management on hard surfaces, Phase I - Further identification of objectives and elements that should be part of a DSS and Certification System', *Plant Research International B.V. Wageningen UR. Nota 69A*, p. 1-49.
- Lehni, M. (2000) 'Eco-efficiency, creating more value with less impact', *World Business Council for Sustainable Development, Report*, p. 1-36.
- Minero, F.J.G., Iglesias, I., Jato, V., Aira, M.J., Candau, P., Morales, J. & Tomas, C. (1998) 'Study of the pollen emissions of Urticaceae, Plantaginaceae and Poaceae at five sites in western Spain', *Aerobiologia* 14, p. 117-129.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2002) '21 December 2001. - Decreet houdende vermindering van het gebruik van bestrijdingsmiddelen door openbare diensten in het Vlaams Gewest', p. 1-2.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2004) '14 Juli 2004. - Besluit van de Vlaamse Regering houdende nadere regels inzake de reductieprogramma's ter vermindering van het gebruik van bestrijdingsmiddelen door openbare diensten in het Vlaamse Gewest.', p. 1-2.
- National Institutes of Health (2013) *ImageJ, Image Processing and Analysis in Java*, [Online], Available: <http://imagej.nih.gov/ij/index.html> [25 May 2013].
- Nazer, C., Bodulovic, Z. & Somervaille, A. (1999) 'Evaluation of alternative methods of weed control in municipal areas', *Twelfth Australian weeds Conference*, p. 1-4.
- OCW (2009) 'Handleiding voor het ontwerp en de uitvoering van verhardingen in betonstraatstenen', p. 1-76.
- Oke, T.R. & Maxwell, G.B. (1975) 'Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver', *Atmospheric Environment, Vol. 9*, p. 191-200.
- Pieters, J. (2009a) 'Fysica 4: Fysische transportverschijnselen. Deel 2: warmteoverdracht', *Universiteit Gent, faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep biosysteemtechniek.*, p. 1-124.
- Pieters, J. (2009b) 'Fysica 4: Fysische transportverschijnselen. Deel2: warmteoverdracht. Formularium', *Universiteit Gent, faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep biosysteemtechniek.*, p. 1-25.
- Rask, A.M. & Kristoffersen, P. (2007) 'A review of non-chemical weed control on hard surfaces', *Weed Research* 47, p. 370-380.

- Rask, A.M., Larsen, S.U., Andreasen, C. & Kristoffersen, P. (2013) 'Determining treatment frequency for controlling weeds on traffic islands using chemical and non-chemical weed control', *Weed Research*, p. 1-10.
- Reheul, D. & De Smet, S. (2007) 'Duurzame systemen', *UGent, Faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep Plantaardige en Dierlijke Productie*.
- Rheinmedia GmbH (2013) *Onkruidherkenning*, [Online], Available: [http://unkraut.rheinmedia.de/cgi-bin/unkraut\\_ausgabe.cgi?sprache=nl&partner=irbab&ugr=&lexikon\\_sprache=nl&lexikon\\_id=&funktion=set\\_baum&baum\\_ebene\\_0=&baum\\_ebene\\_1=&baum\\_ebene=0&auswahl\\_blaetter=&auswahl\\_blaetter=](http://unkraut.rheinmedia.de/cgi-bin/unkraut_ausgabe.cgi?sprache=nl&partner=irbab&ugr=&lexikon_sprache=nl&lexikon_id=&funktion=set_baum&baum_ebene_0=&baum_ebene_1=&baum_ebene=0&auswahl_blaetter=&auswahl_blaetter=) [28 May 2013].
- Riemens, M., Groeneveld, R. & Uffing, A. (2006) 'Onkruidpreventie op verhardingen', *Plant Research International B.V. Wageningen UR. Nota 373*, p. 32.
- Ritz, C. & Streibig, J.C. (2005) 'Bioassay analysis using R.', *Statistical Software 12*, p. 1-22.
- Saft, R.J. (2005) 'Update Milieuanalyse 'Onkruidbestrijding op verhardingen'', *IVAM, rapportnummer 05370*, p. 1-36.
- Saft, R.J. & Staats, N. (2002) 'Beslisfactoren voor onkruidbestrijding op verhardingen 'LCA, risico-analyse, kostenanalyse en hinderbeleving''.', *IVAM Environmental Research b.v., Universiteit van Amsterdam*, p. 1-79.
- Sirvydas, A., Lazauskas, P., Stepanas, A., Nadzeikiene, J. & Kerpauskas, P. (2006) 'Plant temperature variation in the thermal weed control process.', *Journal of Plant Diseases and Protection*, p. 355-361.
- Spijker, J.H., Hekman, J., Teunissen, M.B. & Mantingh, R. (2002) 'Onkruid vergaat wel! Handboek voor gifvrij beheer van groen en verhardingen in gemeenten', *Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen*, p. 1-117.
- Steppe, K. (2011) 'Ecofysiologie', *Universiteit Gent, faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep Toegepaste ecologie en milieubiologie, cursus*.
- Streibig, J.C., Rudemo, M. & Jensen, J.E. (1993) 'Dose-response curves and statistical models.', *Herbicide Bioassays (eds. J.C. Streibig and P. Kudsk)*, p. 29-55.
- The council of the European Communities (1991) 'Council Directive of 15 July 1991 concerning the placing of plant protection products on the market (91/414/EEC)', *Official Journal of the European Communities N° L 230*, p. 1-32.
- Tindall, D.W., Reid, D.G. & James, G.W. (2002) 'Method for weed control with foam', *European patent specification, EP 1 450 603 B1*, p. 1-14.
- Ulloa, S.M., Datta, A., Bruening, C., Gogos, G., Arkebauer, T.J. & Knezevic, S.Z. (2012) 'Weed control and crop tolerance to propane flaming as influenced by time of day', *Crop Protection 31*, p. 1-7.
- Van der Meeren, P. (2009) 'Fysica 3: Thermodynamica', *Universiteit Gent, faculteit bio-ingenieurswetenschappen, vakgroep toegepaste analytische en fysische chemie, cursus*.

van der Meijden, R. (2008) 'Heukels 'Flora van Nederland' 23e editie. Groningen/Houten, Wolters-Noordhoff', p. 1-685.

Van der Vaart, A. (1998) *Asymptotic Statistics*, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Vercruyse, F. & Steurbaut, W. (2002) 'POCER, the pesticide occupational and environmental risk indicator', *Crop Protection* 21, p. 307-315.

Vermeulen, G.D., van Zuydam, R.P. & Kurstjens, D.A.G. (2002) 'Toepassingsmogelijkheden van niet-chemische technieken voor onkruidbestrijding op verhardingen', *Instituut voor Milieu- en Agritechniek, Wageningen Universiteit, Nota P 2002-91*, p. 1-79.

Vermeulen, G.D., Verwijs, B.R., Groeneveld, R.M.W., Luijendijk, C.D. & Kempenaar, C. (2004) 'Evaluatie methoden voor onkruidbestrijding op trottoir. Verslag van proefjaren 2001 t/m 2003.', *Agrotechnology & Food Innovations B.V., Wageningen UR, Rapport 154*, p. 1-47.

Vermeulen, G.D., Verwijs, B.R. & Kempenaar, C. (2007) 'Effectiveness of weed control methods on pavement', *Plant Research International, Wageningen UR*, p. 1 - 6.

Vlaamse Overheid (2013) '15 MAART 2013. - Besluit van de Vlaamse Regering houdende nadere regels inzake duurzaam gebruik van pesticiden in het Vlaamse Gewest voor niet-land- en tuinbouwactiviteiten en de opmaak van het Vlaams Actieplan Duurzaam Pesticidengebruik'.

VMM (2009) 'Leidraad pesticidentoets 2009', p. 1-36.

VMM (2012) *Zonder is gezonder, op verhardingen*, [Online], Available: <http://www.zonderisgezonder.be/openbare-besturen/probleemoplosser/ongewenste-planten/op-verhardingen> [12 Dec 2012].

VMM (2013) 'Gedoopte gewasbeschermingsmiddelen 2013', p. 1-35.

WAVE (2013) *WAVE 100% water tegen onkruid*, [Online], Available: <http://www.waveonkruidbestrijding.be/index.html> [3 May 2013].

Zabkiewicz, J.A. (2000) 'Adjuvants and herbicidal efficacy - present state and future prospects', *Weed Research* 40, p. 139-149.

# Bijlagen

## Bijlage I: Gebruikte modellen en bijhorende parameters van de verschillende dosis-respons curves

Tabel I.1 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld met water van 78, 88 en 98°C in het jongste ontwikkelingsstadium (39d), berekend op basis van de bedekking, 7 dagen na behandeling (Experiment 1).

soort	temperatuur*	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
Canadese fijnstraal	98	1.22499 $\pm$ 0.25441	0.0000	128.69693 $\pm$ 7.82019	0.0000	146.52516 $\pm$ 35.71151	0.0001
	88	4.67990 $\pm$ 2.33903	0.0485	65.48134 $\pm$ 6.69490	0.0000	681.66850 $\pm$ 72.02799	0.0000
	78	3.67546 $\pm$ 1.08156	0.0010	80.01359 $\pm$ 6.12818	0.0000	611.01047 $\pm$ 54.61281	0.0000
Engels raaigras	98	1.62902 $\pm$ 0.61545	0.0098	169.98727 $\pm$ 15.45251	0.0000	766.95764 $\pm$ 140.49839	0.0000
	88	7.49153 $\pm$ 10.49395	0.4774	151.18595 $\pm$ 11.76279	0.0000	1104.51730 $\pm$ 220.18459	0.0000
	78	2.17760 $\pm$ 0.88575	0.0161	215.01721 $\pm$ 13.53468	0.0000	1023.55693 $\pm$ 153.41227	0.0000
grote weegbree	98	2.16927 $\pm$ 0.92584	0.0215	162.30599 $\pm$ 24.21867	0.0000	373.85718 $\pm$ 100.80944	0.0004
	88	0.81137 $\pm$ 0.33909	0.0189	233.70517 $\pm$ 24.13138	0.0000	299.27739 $\pm$ 121.79808	0.0160
	78	2.14324 $\pm$ 0.58460	0.0004	296.88003 $\pm$ 20.07199	0.0000	589.93741 $\pm$ 66.99309	0.0000
paardenbloem	98	0.80952 $\pm$ 0.23661	0.0009	204.45424 $\pm$ 14.73647	0.0000	144.28330 $\pm$ 55.99135	0.0116
	88	1.54390 $\pm$ 0.29138	0.0000	207.13756 $\pm$ 14.04329	0.0000	400.34857 $\pm$ 58.61117	0.0000
	78	3.01657 $\pm$ 1.02108	0.0040	165.47401 $\pm$ 10.61174	0.0000	843.97051 $\pm$ 71.85093	0.0000
straatgras	98	1.15909 $\pm$ 0.34388	0.0011	194.97063 $\pm$ 17.59017	0.0000	454.08126 $\pm$ 105.74872	0.0000
	88	2.20604 $\pm$ 0.64911	0.0010	218.58093 $\pm$ 16.69188	0.0000	715.26912 $\pm$ 83.51313	0.0000
	78	2.67268 $\pm$ 0.67068	0.0001	255.18965 $\pm$ 14.34482	0.0000	726.15767 $\pm$ 53.94636	0.0000
witte klaver	98	1.41134 $\pm$ 0.35065	0.0001	385.19022 $\pm$ 25.76232	0.0000	440.00625 $\pm$ 67.58966	0.0000
	88	2.13917 $\pm$ 1.14987	0.0665	322.51077 $\pm$ 27.86594	0.0000	880.51947 $\pm$ 96.02096	0.0000
	78	4.42120 $\pm$ 0.80569	0.0000	406.24507 $\pm$ 15.85688	0.0000	782.08724 $\pm$ 37.62936	0.0000

**Tabel I.2 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het getransformeerde drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld met water van 78, 88 en 98°C in het jongste ontwikkelingsstadium (39d), berekend op basis van de bedekking, 7 dagen na behandeling (Experiment 1).**

soort	temperatuur*	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
gewone hoornbloem	98	2.43016 $\pm$ 0.45727	0.0000	117.41794 $\pm$ 21.75514	0.0000	303.95435 $\pm$ 64.92343	0.0000
	88	2.74986 $\pm$ 1.63887	0.0969	91.60296 $\pm$ 18.33178	0.0000	649.23248 $\pm$ 168.33011	0.0002
	78	4.19690 $\pm$ 1.26546	0.0013	87.05278 $\pm$ 10.86015	0.0000	694.00455 $\pm$ 70.17597	0.0000

**Tabel I.3 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld met water van 78, 88 en 98°C in het oudste ontwikkelingsstadium (81d), berekend op basis van de bedekking, 7 dagen na behandeling (Experiment 1).**

soort	temperatuur*	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
Canadese fijnstraal	98	1.64297 $\pm$ 0.90545	0.0729	64.31141 $\pm$ 8.76716	0.0000	640.57777 $\pm$ 165.47072	0.0002
	88	2.31429 $\pm$ 0.64505	0.0005	86.29192 $\pm$ 8.28780	0.0000	475.40545 $\pm$ 72.64392	0.0000
	78	1.70572 $\pm$ 0.40462	0.0001	106.92452 $\pm$ 7.12672	0.0000	659.81678 $\pm$ 87.23293	0.0000
Engels raaigras	98	1.19821 $\pm$ 0.28290	0.0001	206.33640 $\pm$ 13.36042	0.0000	686.26699 $\pm$ 112.37157	0.0000
	88	29.58703 $\pm$ 61.32393	0.6307	147.03432 $\pm$ 6.18882	0.0000	1025.67192 $\pm$ 93.46647	0.0000
	78	0.94902 $\pm$ 0.48492	0.0536	178.16601 $\pm$ 14.35537	0.0000	1945.24544 $\pm$ 1031.65564	0.0628
gewone hoornbloem	98	2.15954 $\pm$ 0.55187	0.0002	97.60128 $\pm$ 8.65822	0.0000	535.86410 $\pm$ 66.73320	0.0000
	88	2.04462 $\pm$ 1.36379	0.1380	99.89518 $\pm$ 6.80270	0.0000	1488.74494 $\pm$ 562.89013	0.0100
	78	7.69124 $\pm$ 5.17399	0.1413	102.96959 $\pm$ 4.13289	0.0000	1124.55148 $\pm$ 123.58861	0.0000
grote weegbree	98	2.72559 $\pm$ 0.52289	0.0000	198.50858 $\pm$ 14.30898	0.0000	326.39409 $\pm$ 34.96361	0.0000
	88	1.82908 $\pm$ 0.31242	0.0000	198.31399 $\pm$ 12.85960	0.0000	332.66216 $\pm$ 43.99703	0.0000
	78	1.23340 $\pm$ 0.44497	0.0070	162.98358 $\pm$ 12.59394	0.0000	868.55372 $\pm$ 207.76689	0.0001
paardenbloem	98	1.12893 $\pm$ 0.22827	0.0000	167.18628 $\pm$ 11.22343	0.0000	248.91570 $\pm$ 50.28546	0.0000
	88	1.30272 $\pm$ 0.23588	0.0000	175.29870 $\pm$ 11.08657	0.0000	352.58977 $\pm$ 55.88209	0.0000
	78	1.94098 $\pm$ 0.58595	0.0014	166.80034 $\pm$ 13.48752	0.0000	604.80602 $\pm$ 77.59318	0.0000
straatgras	98	1.11778 $\pm$ 0.25450	0.0000	107.80779 $\pm$ 7.45798	0.0000	302.70306 $\pm$ 60.43116	0.0000
	88	1.48061 $\pm$ 0.29685	0.0000	123.00037 $\pm$ 6.99353	0.0000	643.74777 $\pm$ 76.54949	0.0000
	78	1.44242 $\pm$ 0.36535	0.0002	116.66184 $\pm$ 6.81378	0.0000	858.84961 $\pm$ 112.08510	0.0000

**Tabel I.4 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld met water van 98°C in een verschillende ontwikkelingsstadium, berekend op basis van de bedekking, 7 dagen na behandeling (Experiment 1).**

soort	ontwikkelingsstadium*	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
Canadese fijnstraal	L1	1.64256 $\pm$ 0.67544	0.017	64.31166 $\pm$ 6.54278	0.000	640.65166 $\pm$ 123.52181	0.000
	L2	1.83852 $\pm$ 0.34040	0.000	86.31830 $\pm$ 6.25898	0.000	295.49084 $\pm$ 43.55857	0.000
	L3	1.22481 $\pm$ 0.20124	0.000	128.70436 $\pm$ 6.18480	0.000	146.47705 $\pm$ 28.24526	0.000
Engels raaigras	L1	1.19903 $\pm$ 0.23941	0.0000	206.28546 $\pm$ 11.29517	0.0000	686.63168 $\pm$ 95.03927	0.0000
	L2	0.92361 $\pm$ 0.54680	0.0947	105.46769 $\pm$ 12.64343	0.0000	1393.65608 $\pm$ 709.84415	0.0527
	L3	1.62931 $\pm$ 0.42806	0.0003	169.98640 $\pm$ 10.74584	0.0000	766.88792 $\pm$ 97.66819	0.0000
gewone hoornbloem	L1	2.15946 $\pm$ 0.53509	0.0001	102.15792 $\pm$ 8.78708	0.0000	535.85125 $\pm$ 64.70584	0.0000
	L2	3.15726 $\pm$ 0.72909	0.0000	108.16044 $\pm$ 5.75133	0.0000	672.49461 $\pm$ 46.50268	0.0000
	L3	2.32799 $\pm$ 0.37689	0.0000	122.10271 $\pm$ 7.80905	0.0000	308.34731 $\pm$ 30.16644	0.0000
grote weegbree	L1	2.72566 $\pm$ 0.47887	0.0000	198.50865 $\pm$ 13.10325	0.0000	326.39244 $\pm$ 32.01689	0.0000
	L2	1.50603 $\pm$ 0.54199	0.0067	89.10490 $\pm$ 12.00096	0.0000	234.57177 $\pm$ 76.31251	0.0028
	L3	2.16924 $\pm$ 0.45679	0.0000	162.30494 $\pm$ 11.94893	0.0000	373.85151 $\pm$ 49.73700	0.0000
paardenbloem	L1	1.12847 $\pm$ 0.19689	0.0000	167.19470 $\pm$ 9.68054	0.0000	248.81480 $\pm$ 43.37520	0.0000
	L2	0.92606 $\pm$ 0.19458	0.0000	162.33735 $\pm$ 9.69774	0.0000	191.14652 $\pm$ 46.63844	0.0000
	L3	0.80922 $\pm$ 0.15522	0.0000	204.42378 $\pm$ 9.65940	0.0000	144.21287 $\pm$ 36.72391	0.0004
straatgras	L1	1.11781 $\pm$ 0.35536	0.0023	107.81487 $\pm$ 10.41211	0.0000	302.62932 $\pm$ 84.34758	0.0006
	L2	1.09970 $\pm$ 0.42962	0.0124	93.14329 $\pm$ 10.55931	0.0000	310.85230 $\pm$ 112.42362	0.0071
	L3	1.15895 $\pm$ 0.20848	0.0000	194.97139 $\pm$ 10.66488	0.0000	454.05840 $\pm$ 64.11719	0.0000

\* L1 = 81, L2 = 60 en L3 = 39 dagen oud.

**Tabel I.5 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld met water van 78, 88 en 98°C in een ontwikkelingsstadium van 39, 60 of 81d, berekend op basis van de bedekking, 7 dagen na behandeling (Experiment 1).**

soort	leeftijd	temp	modelparameters					
			b		d		e	
			gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
Canadese fijnstraal	L3	T1	1.19410 $\pm$ 0.43721	0.0069	128.74309 $\pm$ 13.16540	0.0000	144.80782 $\pm$ 61.53443	0.0196
Engels raaigras	L3	T1	1.62919 $\pm$ 0.47027	0.0006	169.98914 $\pm$ 11.80692	0.0000	766.86665 $\pm$ 107.31223	0.0000
gewone hoornbloem	L3	T1	2.32804 $\pm$ 0.63868	0.0003	122.10183 $\pm$ 13.23283	0.0000	308.34929 $\pm$ 51.11876	0.0000
grote weegbree	L3	T1	2.16925 $\pm$ 0.50169	0.0000	162.30394 $\pm$ 13.12376	0.0000	373.86094 $\pm$ 54.62814	0.0000
paardenbloem	L3	T1	0.80929 $\pm$ 0.21086	0.0002	204.42117 $\pm$ 13.12316	0.0000	144.23589 $\pm$ 49.89052	0.0043
straatgras	L3	T1	1.15892 $\pm$ 0.26391	0.0000	194.97833 $\pm$ 13.50151	0.0000	454.03332 $\pm$ 81.16664	0.0000
witte klaver	L3	T1	1.41135 $\pm$ 0.17882	0.0000	385.19004 $\pm$ 13.13747	0.0000	440.00323 $\pm$ 34.46682	0.0000
Canadese fijnstraal	L1	T3	1.70572 $\pm$ 0.56845	0.0031	106.92836 $\pm$ 10.01286	0.0000	659.78273 $\pm$ 122.54693	0.0000
Engels raaigras	L1	T3	0.96357 $\pm$ 0.39183	0.0150	178.19269 $\pm$ 11.79617	0.0000	1904.25372 $\pm$ 774.26680	0.0150
gewone hoornbloem	L1	T3	7.68992 $\pm$ 8.25282	0.3528	98.07877 $\pm$ 6.28076	0.0000	1124.58201 $\pm$ 197.22604	0.0000
grote weegbree	L1	T3	1.23342 $\pm$ 0.39549	0.0022	162.98242 $\pm$ 11.19320	0.0000	868.55257 $\pm$ 184.65280	0.0000
paardenbloem	L1	T3	1.94197 $\pm$ 0.60727	0.0017	166.78104 $\pm$ 13.96650	0.0000	604.69036 $\pm$ 80.31074	0.0000
straatgras	L1	T3	1.44242 $\pm$ 0.57064	0.0124	116.66184 $\pm$ 10.64258	0.0000	858.85075 $\pm$ 175.06944	0.0000

**Tabel I.6 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het drie parameter weibull model voor de verschillende soorten behandeld met water van 98°C in het jongste ontwikkelingsstadium (39 dagen oud) , berekend op basis van droge bovengrondse biomassa 28 d na behandeling (Experiment 1).**

soort	modelparameters					
	b		d		e	
	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
Canadese fijnstraal	1.3257 $\pm$ 0.36693	0.0004	0.6505 $\pm$ 0.08423	0.0000	465.8500 $\pm$ 84.85300	0.0000
Engels raaigras	0.8462 $\pm$ 0.64018	0.1873	1.3852 $\pm$ 0.14925	0.0000	1660.2000 $\pm$ 997.10000	0.0970
gewone hoornbloem	2.1842 $\pm$ 0.28031	0.0000	0.7830 $\pm$ 0.09099	0.0000	349.1800 $\pm$ 34.58500	0.0000
grote weegbree	0.9850 $\pm$ 0.26938	0.0003	1.1815 $\pm$ 0.12963	0.0000	509.1700 $\pm$ 90.20700	0.0000
paardenbloem	0.3599 $\pm$ 0.18008	0.0466	0.9310 $\pm$ 0.10966	0.0000	295.3500 $\pm$ 157.88000	0.0624
straatgras	6.5814 $\pm$ 5.33010	0.2179	0.9360 $\pm$ 0.08090	0.0000	999.8200 $\pm$ 49.72000	0.0000
witte klaver	3.0395 $\pm$ 0.48087	0.0000	4.0371 $\pm$ 0.26407	0.0000	737.1800 $\pm$ 32.52300	0.0000

**Tabel I.7 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het getransformeerde drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld met water van 98°C in een ontwikkelingsstadium van 86 dagen oud, berekend op basis van de totale biomassa, 12 weken na de eerste behandeling (Experiment 2)**

soort	bestrijdingsinterval	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
paardenbloem	6 weken	0.7077 $\pm$ 0.19927	0.0005	6.1916 $\pm$ 0.31361	0.0000	1717.0933 $\pm$ 372.07620	0.0000
	4 weken	0.2709 $\pm$ 0.15968	0.0917	6.1815 $\pm$ 0.31419	0.0000	813.8188 $\pm$ 606.34824	0.1814
	3 weken	0.6283 $\pm$ 0.15228	0.0001	6.1957 $\pm$ 0.31386	0.0000	872.7319 $\pm$ 262.83846	0.0011
	2 weken	-	-	-	-	-	-
grote weegbree	6 weken	-	-	-	-	-	-
	4 weken	1.1367 $\pm$ 0.21581	0.0000	2.6160 $\pm$ 0.15800	0.0000	1273.6254 $\pm$ 233.89034	0.0000
	3 weken	0.9110 $\pm$ 0.20836	0.0000	2.5982 $\pm$ 0.15930	0.0000	1032.4162 $\pm$ 261.28756	0.0001
	2 weken	1.3770 $\pm$ 0.28167	0.0000	2.5909 $\pm$ 0.15916	0.0000	1550.0165 $\pm$ 258.52232	0.0000
Engels raaigras	6 weken	0.9493 $\pm$ 0.45830	0.0399	11.2715 $\pm$ 0.54320	0.0000	7349.7626 $\pm$ 3946.38741	0.0644
	4 weken	1.1196 $\pm$ 0.33333	0.0010	11.2339 $\pm$ 0.54999	0.0000	2792.1305 $\pm$ 490.36550	0.0000
	3 weken	1.0406 $\pm$ 0.33675	0.0024	11.1604 $\pm$ 0.55881	0.0000	1697.3790 $\pm$ 358.50455	0.0000
	2 weken	-	-	-	-	-	-

**Tabel I.8 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het getransformeerde drie parameter log-logistic model voor de verschillende soorten behandeld gedurende de ochtend, middag of avond met water van 98°C in een ontwikkelingsstadium van 46 dagen oud, berekend op basis van bedekking 7 d na behandeling (Experiment 3).**

soort	behandelingstijdstip*	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
paardenbloem	ochtend	1.00655 $\pm$ 0.17885	0.0000	197.07678 $\pm$ 24.92369	0.0000	242.62169 $\pm$ 73.88863	0.0014
	middag	0.89281 $\pm$ 0.13470	0.0000	110.19310 $\pm$ 13.83764	0.0000	129.85024 $\pm$ 43.72478	0.0036
	avond	1.05416 $\pm$ 0.12314	0.0000	165.01905 $\pm$ 20.77837	0.0000	108.01853 $\pm$ 29.99357	0.0005
gewone hoornbloem	ochtend	3.54767 $\pm$ 0.84265	0.0001	70.22879 $\pm$ 14.29279	0.0000	334.44338 $\pm$ 70.15384	0.0000
	middag	2.78794 $\pm$ 0.39787	0.0000	80.26029 $\pm$ 17.91302	0.0000	135.38418 $\pm$ 28.65351	0.0000
	avond	4.17204 $\pm$ 0.69121	0.0000	71.06301 $\pm$ 17.15431	0.0001	202.06333 $\pm$ 38.00166	0.0000

\* ochtend: 8u (2u na zonsopkomst), middag: 13u (7u na zonsopkomst), avond: 18u (12u na zonsopkomst).



**Tabel I.9 Modelparameters ( $\pm$ SE) met bijhorende p-waarde van het drie parameter log-logistic model voor Engels raaigras behandeld gedurende de ochtend, middag of avond met water van 98°C in een ontwikkelingsstadium van 46 dagen oud, berekend op basis van bedekking 7 d na behandeling (Experiment 3).**

soort	tijdstip	modelparameters					
		b		d		e	
		gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde	gem. $\pm$ SE	p-waarde
Engels raaigras	ochtend	9.29701 $\pm$ 4.65776	0.0485	109.39088 $\pm$ 6.51683	0.0000	938.35683 $\pm$ 39.03079	0.0000
	middag	1.01080 $\pm$ 0.47174	0.0344	109.56654 $\pm$ 11.85788	0.0000	724.55497 $\pm$ 209.11432	0.0008
	avond	1.31457 $\pm$ 0.41199	0.0019	128.01254 $\pm$ 11.57414	0.0000	553.13251 $\pm$ 112.55653	0.0000

\* ochtend: 8u (2u na zonsopkomst), middag: 13u (7u na zonsopkomst), avond: 18u (12u na zonsopkomst).