



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2014-2015

Onkruidwerend vermogen van voegvullingen

Jitse Faes

Promotor: Prof. Dr. ir. Benny De Cauwer

Tutor: ir. Sofie Claerhout

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



Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen

Academiejaar 2014-2015

Onkruidwerend vermogen van voegvullingen

Jitse Faes

Promotor: Prof. Dr. ir. Benny De Cauwer

Tutor: ir. Sofie 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, 5 juni 2015.

Prof. Dr. ir. Benny De Cauwer

Jitse Faes

ir. Sofie Claerhout

Woord vooraf

Met trots kan ik u het resultaat voorstellen van een jaar zwoegen. Jaren heb ik trillend de angstaanjagende verhalen van andere studenten aangehoord over hun masterproef, die een echte hel zou geweest zijn maar achteraf toch eerder liefde dan haat zou oproepen. Allemaal overdreven, dacht ik net als mijn vele collega's. Wel, het was een vergissing. Ook bij mij is het een verhaal geworden van veel hard werk, mislukkingen, frustraties en blijdschap, waarbij uiteindelijk de liefde het overwon van de haat.

Maar deze emotionele rollercoaster is er uiteraard geen die ik alleen heb moeten ondergaan, vandaar zou ik dan ook graag heel wat mensen bedanken. Allereerst mijn promotor Prof. Dr. Ir. Benny De Cauwer en tutor ir. Sofie Claerhout. De talloze uren die ze beiden waarschijnlijk hoofdschuddend hebben zitten staren naar mijn voorgaande versies zijn van onschatbare waarde geweest. Ook alle medewerkers van de vakgroep Plantaardige Productie, in het bijzonder deze van het departement Herbologie, verdienen veel dank voor alle hulp bij het aanleggen, tellen en oogsten van de proeven. Het was met overschot de zomer waarin ik het meest schoolwerk heb gedaan, maar tevens ook een van de aangenaamste zomers uit mijn leven.

Ook nog een dankwoord aan mijn vrienden, mijn familie en mijn vriendin voor niet enkel het helpen bij de aanleg en/of oogst van de proeven, maar ook voor de steun tijdens het jaar. Dit werk zou veel blanco pagina's bevatten als ik eender welke van alle bovenvermelde personen niet had gehad om me onvoorwaardelijk te steunen.

Jitse Faes,

Poperinge, 4 juni 2015

Woord vooraf

Inhoudsopgave

1. INLEIDING	1
2. LITERATUURSTUDIE	3
2.1. Context van onkruidbeheersing op verharde oppervlakken	3
2.1.1. Belang	3
2.1.2. Wettelijk kader in België	5
2.1.2.1. Federaal	5
2.1.2.2. Vlaanderen	5
2.1.2.3. Wallonië	6
2.1.2.4. Brussels hoofdstedelijk gewest	6
2.1.3. Geïntegreerd Onkruidbeheer	8
2.1.3.1. Preventieve maatregelen	9
2.1.3.1.1. Ontwerp en uitvoering	9
2.1.3.1.2. Materiaalkeuze	12
2.1.3.2. Curatieve maatregelen	13
2.1.3.2.1. Chemische onkruidbestrijding	13
2.1.3.2.2. Mechanische onkruidbestrijding	14
2.1.3.2.3. Thermische onkruidbestrijding	14
2.2. Gevalstudie: voegvullingen voor bestratingen met kleinschalige elementen	16
2.2.1. Indelingswijze van voegvullingen	16
2.2.1.1. Klassieke ongebonden materialen	16
2.2.1.2. Klassieke gebonden materialen	17
2.2.1.3. Innovatieve materialen	17
2.2.2. Functie van een voegvulling	22
2.2.2.1. Drainage	22
2.2.2.2. Stevigheid van het wegdek	23
2.2.3. Onkruidwerend vermogen	25
2.2.3.1. Definitie	25
2.2.3.2. Invloedfactoren	25
2.2.4. Gestelde eisen	29
2.2.5. Ongewenste nevenwerkingen	31
3. MATERIAAL EN METHODEN	33
3.1. Voegvullingsmaterialen	33
3.2. Gebruikte testsoorten	35
3.3. Experimenten	36
3.3.1. Experiment 1: Neerslagafhankelijkheid van onkruidwerend vermogen van voegvullingen	36
3.3.1.1. Doelstellingen	36
3.3.1.2. Proefopzet	36
3.3.1.3. Metingen	39

Inhoudsopgave

3.3.1.4.	Statistische verwerking	39
3.3.2.	Experiment 2: Onkruidwerend vermogen van voegvullingen onder kunstmatige en semi-natuurlijke omstandigheden	41
3.3.2.1.	Doelstellingen	41
3.3.2.2.	Proefopzet	41
3.3.2.3.	Metingen	42
3.3.2.4.	Statistische verwerking	42
3.3.3.	Experiment 3: Onkruidwerend vermogen van commercieel beschikbare voegvullingen	43
3.3.3.1.	Doelstellingen	43
3.3.3.2.	Proefopzet	43
3.3.3.3.	Metingen	44
3.3.3.4.	Statistische verwerking	44
4.	RESULTATEN EN DISCUSSIE	47
4.1.	Experiment 1	47
4.1.1.	Resultaten	47
4.1.2.	Discussie	56
4.2.	Experiment 2	58
4.2.1.	Resultaten	58
4.2.2.	Discussie	64
4.3.	Experiment 3	66
4.3.1.	Resultaten	66
4.3.2.	Discussie	76
5.	BESLUIT	79
6.	VERDER ONDERZOEK	81
	REFERENTIELIJST	83
	BIJLAGES	91

Lijst van afkortingen

ANOVA	Analysis Of Variance
AWV	Agentschap Wegen en Verkeer
Cfb	gematigd zeeklimaat (klimaatclassificatie van Köppen)
CMA	Compendium voor Monsterneming en Analyse
CROW	Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechiek
CWEDD	Conseil Wallon de l'Environnement pour le Développement Durable
DCM	De Ceuster Meststoffen
DOB	Duurzaam OnkruidBeheer of verhardingen
EC	Elektrische Conductiviteit
EDTA	EthyleenDiamineTetra-Acetaat
EU	Europese Unie
FRPP	Federaal ReductieProgramma voor Pesticiden
Fvb-ffc	Fonds voor Vakopleiding in de Bouwnijverheid - Fonds de Formation professionnelle de la Construction
IGG	Ingenieurbüro für Gefahrstoff- und Gefahrgutberatung
ILVO	Instituut voor Landbouw- en VisserijOnderzoek
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut
KNB	Koninklijke Nederlandse Bouwkeramiek
MB _F	MethyleenBlauwwaarde
MF	Medium Fine (bepaalde klasse voor fijnheidsmodulus f_m van zand)
NBN EN	Nationaal Bureau voor Normalisatie; Europese Norm
NMBS	Nationale Maatschappij der Belgische Spoorwegen
OCW	OpzoekingsCentrum voor de Wegenbouw
PREVOSTRAT	Prestatie-eisen voor innovatieve voegvullingsmaterialen in bestratingen met kleinschalige elementen
PTB	PolyTechnisch Bedrijf
PTV	Prescriptions Techniques - Technische Voorschriften
PWRP	Programme Wallon de Réduction des Pesticides
TukeyHSD	Tukey's Honest Significant Differences
UGent-FBW	Universiteit Gent – Faculteit Bio-ingenieursWetenschappen
VELT	Vereniging voor Ecologisch Leven en Tuinieren
VLAREA	Vlaams Reglement voor Afvalvoorkoming en –beheer
VMM	Vlaamse MilieuMaatschappij
WNZ	Weken Na Zaaien

Lijst van afkortingen

Samenvatting

Om onkruidgroei op verhardingen te voorkomen, moet een geschikt voegvullingsmateriaal gekozen worden. Tussen voegvullingsmaterialen zijn grote verschillen aanwezig op vlak van onder andere korrelgrootte, kleur, chemische samenstelling, pH en waterdoorlatendheid. Deze masterproef bestudeert de impact van verschillende van deze factoren en van omgevingsfactoren op het onkruidwerend vermogen van voegvullingsmaterialen.

Eerst werd bepaald of het neerslagregime (neerslaghoeveelheid en lengte van neerslagloze periodes) een effect heeft op het onkruidwerend vermogen van enkele voegvullingen. Hiertoe werd voor drie verschillende neerslagregimes één maand na inzaai de plantopkomst en de droge bovengrondse biomassa bepaald van twee veelvoorkomende onkruidsoorten. Hieruit bleek dat het neerslagregime voor sommige voegvullingsmaterialen een grote impact had op hun onkruidwerend vermogen (verschillen in droge biomassa van 478 % werden opgemeten tussen neerslagregimes). Andere materialen vertoonden wel uiteenlopende plantopkomst en biomassa-accumulatie bij verschillende neerslagregimes, maar presteerden ten opzichte van de andere materialen even onkruidwerend ongeacht het neerslagregime.

Vervolgens werd onderzocht of de bekomen data uit dit experiment met drie verschillende neerslagregimes – die in kunstmatige omstandigheden plaatsvonden – extrapoleerbaar zijn naar semi-natuurlijke omstandigheden. Significante correlaties werden gevonden tussen een identieke proef in semi-natuurlijke omstandigheden en elk van de drie proeven in kunstmatige omstandigheden. Deze correlaties bleken echter afhankelijk te kunnen zijn van zowel de plantensoort waarvoor getest werd, de vervuilingsgraad van het voegvullingsmateriaal als het voegvullingsmateriaal zelf. Bijgevolg kan men data uit kunstmatige omstandigheden wel extrapoleren naar semi-natuurlijke omstandigheden, maar moet men zich ervan vergewissen dat de correlatie niet bij elke vervuilingsgraad, voor elke plantensoorten en voor elke voegvulling significant is.

Om te bepalen of de plantensoort een effect heeft op het onkruidwerend vermogen van voegvullingen, werd een extra experiment geïnstalleerd. Bij dit experiment werden 5 verschillende plantensoorten getest in een breed gamma aan voegvullingsmaterialen. De resultaten duiden op conclusies die identiek zijn aan wat reeds uit de proeven met verschillende neerslagregimes bleek; de voegvullingsmaterialen zijn voor sommige plantensoorten veel onkruidwerender dan voor andere. Hierbij zijn eigenschappen van de plantensoort en het voegvullingsmateriaal van belang; zouttolerantie vs. zoutgehalte, droogtetolerantie vs. korrelgrootteverdeling/waterdoorlatendheid, pH-tolerantiebereik vs. pH.

Het onkruidwerend vermogen van voegvullingsmaterialen verschilt onderling heel sterk. Zoals reeds vermeld, hebben zowel de plantensoort als de vervuilingsgraad een sterke invloed op het onkruidwerend vermogen van de individuele materialen. Deze variaties naargelang plantensoort en vervuilingsgraad zijn echter zo materiaalspecifiek dat het onmogelijk is categorieën van materialen te vergelijken met elkaar. Binnen de categorieën zijn de verschillen vaak immers zeer groot, vooral voor de klassieke ongebonden materialen.

Tenslotte werd onderzocht of organische vervuiling een rol speelt in het onkruidwerend vermogen van voegvullingsmaterialen. De klassieke ongebonden materialen blijken het meest biomassa-accumulatie te vertonen indien het materiaal uniform vervuild is. De klassieke gebonden materialen en de innovatieve materialen hebben meer last van onkruidgroei indien enkel de toplaag vervuild is.

Samenvatting

1. Inleiding

Reeds lang tracht de mens onkruidgroei te verhinderen op verhardingen. Onkruid zorgt immers voor schade aan de verharding, kan de menselijke gezondheid schaden, kan het zicht belemmeren en zorgt voor een aanblik van verval (Benvenuti, 2004).

Tot voor kort gebeurde de onkruidbestrijding in Vlaanderen voornamelijk met behulp van chemische middelen. Sinds 1 januari 2004 is het in Vlaanderen echter verboden om chemische onkruidbestrijdingsmiddelen in te zetten op openbare verhardingen omwille van de schadelijke effecten op de gezondheid en het milieu. Openbare diensten konden hiervan afwijken mits ze een reductieprogramma volgden. Deze reductieprogramma's moesten uitgevoerd zijn voor 31 december 2014, waardoor sinds 1 januari 2015 alle gebruik van chemische middelen op openbare verhardingen verboden is in Vlaanderen (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2001; Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2009).

Om toch de gewenste onkruidbestrijding te bekomen, wordt steeds meer ingezet op preventie en op niet-chemische, curatieve methoden. Hierbij wordt getracht een optimale combinatie van methoden te bekomen om zo doeltreffend mogelijk te kunnen werken; niet-chemische curatieve methoden brengen immers een aanzienlijke meerkost met zich mee (van Dijk & Kempenaar, 2012). Omwille van deze verhoogde curatieve kosten, is het economisch gezien nuttig om te investeren in een goede preventie. Om een goede preventie te bekomen, is een goed ontwerp, een goede aanleg en een goede materiaalkeuze nodig (Riemens *et al.*, 2005). In deze masterproef wordt onderzoek gedaan naar goede onkruidpreventie door de keuze van onkruidwerende voegvullingsmaterialen. Een sterk onkruidwerend voegvullingsmateriaal kan ervoor zorgen dat curatieve toepassingen tot een absoluut minimum kunnen herleid worden, teneinde de milieu-impact en de kosten van onkruidbestrijding drastisch te verminderen.

Deze masterproef bestaat uit twee delen; een literatuurstudie en een onderzoeksluik. De literatuurstudie bestaat op zijn beurt uit twee onderdelen. Eerst komt de context omtrent onkruidbestrijding aan bod met een overzicht van het wettelijk kader en van de preventieve en curatieve methoden, daarna volgt een gevalstudie over voegvullingen. In het onderzoeksluik worden drie experimenten gepresenteerd en geëvalueerd. Het eerste experiment tracht te bepalen of het neerslagregime een effect heeft op het onkruidwerend vermogen van verschillende voegvullingsmaterialen. Daarnaast wordt gezocht naar eventuele interspecifieke verschillen tussen plantensoorten. In het tweede experiment wordt nagegaan of het onkruidwerend vermogen van voegvullingen *in situ* kan worden bepaald aan de hand van *in vitro* experimenten. In het derde experiment wordt een breed gamma aan voegvullingsmaterialen blootgesteld aan verschillende plantensoorten die erom bekend staan vaak voor te komen op verhardingen. In dit experiment wordt opnieuw onderzocht of het onkruidwerend vermogen van voegvullingen varieert naargelang de plantensoort, maar ook of er inter- en/of intraspecifieke verschillen zijn tussen voegvullings-categorieën. Daarnaast wordt in dit experiment ook nagegaan of de vorm van vervuiling – die onvermijdelijk optreedt na verloop van tijd – een effect heeft op het onkruidwerend vermogen van voegvullingsmaterialen.

2. Literatuurstudie

2.1. Context van onkruidbeheersing op verharde oppervlakken

2.1.1. Belang

Onder “verharde oppervlakken” verstaan we oppervlakken met ofwel een grondbedekking van bijvoorbeeld asfalt, beton of tegels, ofwel met een toplaag bestaande uit los materiaal zoals zand of grind. Deze terreinen komen voor in privétuinen en als openbare verharde terreinen, die in Vlaanderen respectievelijk 176 000 ha en 13 500 ha beslaan, goed voor een totaal van ruwweg 14 %¹ van Vlaanderens oppervlakte (VMM, 2012b). In de verharde oppervlakken groeit onkruid gemakkelijk in open ruimtes van het oppervlak zoals voegen en breuken. Onkruidgroei wordt beïnvloed door de grootte van de open ruimtes en de aanwezigheid van nutriënten, licht en water (Kempenaar *et al.*, 2006). Het is immers hier dat organisch materiaal zich opstapelt. Beschadigde of weinig betreden oppervlakken zijn, samen met straatmeubilair, vaak broeihaarden voor onkruidgroei (Kortenhoff *et al.*, 2001a).

Onkruiden worden op verharde oppervlakken gemeden om verschillende redenen. Ze zorgen voor het verbreden van voegen of eventueel aanwezige breuken, waardoor er zich nog meer organisch materiaal opstapelt en onkruidgroei gestimuleerd wordt (Zwenger *et al.*, 2000). Door het vergroten van breuken verslechtert de toestand van het oppervlak, waardoor dergelijke verhardingen intensiever onderhouden moeten worden. Zeker houtige onkruiden kunnen ernstige schade aanrichten aan een verharding. Uiteindelijk zal de verharding opnieuw aangelegd moeten worden. Onderzoek heeft uitgewezen dat weinig tot geen onkruidbestrijding de levensduur van een verharding kan herleiden van 30 jaar tot 20 of zelfs 10 jaar (Hansen *et al.*, 2004).

Onkruid maakt het oppervlak glibberig, waardoor het betreden van de verharding een groter risico inhoudt voor zowel voetganger als voertuig. Daarnaast kunnen onkruiden de zichtbaarheid van wegmarkeringen of verkeersborden belemmeren, wat opnieuw een gevaar inhoudt voor bestuurders (Rask & Kristoffersen, 2007).

De aanwezigheid van onkruid in voegen en andere open ruimtes die zorgen voor de afvoer van hemelwater, blokkeert deze afvoer. Hierdoor ontstaan plassen en verhoogt het risico op overstroming bij hevige regenval (Rask & Kristoffersen, 2007).

Ook voor de menselijke gezondheid kunnen onkruiden geweerd worden. Verschillende Poaceae (Caffarelli *et al.*, 2000), Asteraceae (Jarai-Komlodi, 2000) en Urticaceae (Grilli Caiola *et al.*, 2002) brengen een bijzonder sterk allergierisico met zich mee en sommige plantensoorten uit deze families – zoals *P. officinalis* – groeien optimaal in stedelijke gebieden (Benvenuti, 2004).

¹ Dit is 13 % privétuinen en 1 % openbare verhardingen. Aangezien tuinen niet enkel verhardingen zijn, is het totale percentage verhardingen in Vlaanderen lager dan 14 % (VMM, 2012b).

2.1.1 Belang

Naast bovengenoemde praktische redenen om onkruidgroei te beperken, is er ook het esthetisch aspect. Mensen houden van structuur, en onkruid hoort voor velen niet thuis op verharde oppervlakken. De aanwezigheid van onkruiden wordt dan ook geassocieerd met een zekere staat van verval (Benvenuti, 2004).

2.1.2. Wettelijk kader in België

2.1.2.1. Federaal

Federaal werd de Europese richtlijn 2009/128/EG² op 4 september 2012 middels een koninklijk besluit omgezet in het Federaal Reductie Programma voor Pesticiden (FRPP). Dit actieplan loopt van 2013 tot 2017 en omvat 41 acties (Europese Commissie, 2014). Het merendeel van deze acties wordt federaal uitgevoerd, 6 acties worden gemeenschappelijk met de gewesten uitgevoerd (Federaal Ministerie, 2012).

Momenteel zijn er voor onkruidbestrijding op verhardingen nog 123 handelsproducten toegelaten in België (Fytoweb, 2015). De biocide bestanddelen van deze middelen zijn voornamelijk glyfosaat en in mindere mate 14 andere werkzame stoffen waaronder oxadiazon, dinatrium-EDTA, ijzersulfaat, 2,4-D en vetzuren.

Verschillende van de ons omringende landen, vooral Nederland, Duitsland, Noorwegen en Zweden, hebben reeds sinds de jaren '90 – of zelfs al langer – een strikte wetgeving omtrent pesticidengebruik (Kristoffersen *et al.*, 2008).

2.1.2.2. Vlaanderen

Op 21 december 2001 besliste de Vlaamse Overheid door middel van een decreet om het gebruik van pesticiden in openbare ruimten vanaf 1 januari 2004 te verbieden. Er mocht – mits motivatie – van het nulgebruik afgeweken worden tot 1 januari 2015 (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2001; Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2009). Openbare diensten die van het nulgebruik wensten af te wijken, moesten een reductieprogramma volgen. Dit reductieprogramma was opgevat als een vijf-sporen-aanpak en verliep volgens een strikte timing (VMM, 2011). Sinds 1 januari 2015 is elk gebruik van pesticiden in openbare ruimten onherroepelijk verboden. Enkel voor uitzonderlijke gevallen, als er een gevaar is voor de mens of het milieu en indien andere middelen ontoereikend zijn, mogen de toegelaten handelsproducten (zie 2.1.2.1) nog toegepast worden (Boonen *et al.*, 2013).

Particulieren mogen nog steeds chemische pesticiden toepassen op privéterreinen. Voor hen is sinds 2012 slechts een beperkt gamma amateurproducten beschikbaar. Deze producten hebben steeds een toelatingsnummer met de letter G ('Garden') en vereisen geen fytolicensie zoals de professionele middelen (Demeyere *et al.*, 2013). Ze zijn 'ready-to-use' en enkel in kleine verpakkingen verkrijgbaar (VMM, 2012b). Aangezien voetpaden behoren tot de openbare weg, is het voor particulieren verboden om op voetpaden chemische bestrijdingsmiddelen in te zetten.

2 Om de gezondheid en het milieu in Europa te beschermen, stelde de Europese Unie in 2009 de richtlijn 2009/128/EG op (Europese Unie, 2009). Deze richtlijn vormt een gemeenschappelijk regelgevingskader ter verwezenlijking van een duurzaam gebruik van pesticiden. Tot pesticiden worden zowel gewasbeschermingsmiddelen als biociden gerekend. De Richtlijn tracht het gebruik van pesticiden te beperken en alternatieve oplossingen te promoten.

Alle lidstaten van de Europese Unie moeten volgens richtlijn 2009/128/EG voor 26 november 2012 een actieplan voor gewasbeschermingsmiddelen voorleggen aan de Europese Commissie en de andere EU-lidstaten. In dit actieplan moeten maatregelen te vinden zijn voor het beperken van het risico en het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen.

2.1.2 Wettelijk kader in België

Langs oppervlaktewaterlichamen³ geldt in Vlaanderen een verbod op pesticiden voor een strook van 6 meter naast het wateroppervlak tenzij het deel uitmaakt van een private tuin, dan geldt de zorgplicht⁴. Op verharde terreinen (bv. parkings) met een oppervlakte kleiner dan 200 m² die niet door openbare diensten worden onderhouden, is een minimumgebruik van pesticiden aangewezen. Op verharde terreinen met kleinere oppervlakten worden amateurproducten aanbevolen (VMM, 2014b).

Op 8 februari 2013 keurde het Vlaams Parlement een decreet goed dat de invulling van de Europese richtlijn 2009/128/EG omvatte (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2013). De maatregelen die in deze richtlijn vervat zitten, komen vaak al voor in het pesticidenreductiedecreet van de Vlaamse Overheid, waardoor veel Vlaamse besturen goed op schema zitten om aan deze richtlijn te voldoen. Vanuit Europa is het gebruik van pesticiden op verhardingen nog steeds toegestaan, waardoor dit decreet, voor verhardingen althans, weinig verandert ten opzichte van het decreet uit 2001 (VMM, 2012a).

2.1.2.3. Wallonië

In het Waals Parlement werd op 22 november 2012 een decreet goedgekeurd dat aan de Europese richtlijn voldeed. Dit PWRP (Programme Wallon de Réduction des Pesticides) beoogde onder meer een reductie van 50 % van de milieueffecten van niet-agrarische pesticiden (CWEDD, 2013). In Wallonië is sinds 1 september 2014 bovendien een verbod van chemische bestrijding op alle verharde oppervlakken (dus ook de privéterreinen) die verbonden zijn met het netwerk voor de opvang van regenwater (Espace Environnement, 2014). Men tracht een verwezenlijking van een “zero fyto” beheer van de openbare ruimten in 2019 te bekomen (Afdeling Milieu en water, Waalse openbare dienst, 2012).

2.1.2.4. Brussels hoofdstedelijk gewest

In het Brussels Hoofdstedelijk Gewest werd in 2004 het gebruik van pesticiden in alle openbare ruimten verboden (Gewestelijke Overheidsdienst Brussel, 2004). Enkel op sportterreinen, verharde terreinen en om sommige planten (sierplanten en houtige planten) te beschermen werd het gebruik nog toegelaten indien alle geïntegreerde bestrijdingsmaatregelen onvoldoende bestrijding opleveren.

Op 20 juni 2013 werd door het Brussels Hoofdstedelijk Parlement een nieuwe ordonnantie aangenomen (Gewestelijke Overheidsdienst Brussel, 2013). Door deze vernieuwing voldeed het Brussels Hoofdstedelijk Gewest aan de Europese richtlijn. De ordonnantie omvat voornamelijk bepalingen met betrekking tot water en natuur, waaronder een uitbreiding van het verbod op gebruik

³ Een oppervlaktewaterlichaam wordt gedefinieerd als een onderscheiden oppervlaktewater, zoals een meer, een wachtbekken, een spaarbekken, een stroom, een rivier, een kanaal, een overgangswater, of een deel van een stroom, rivier, kanaal of overgangswater (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2003).

⁴ Iedere natuurlijke persoon of rechtspersoon die manueel, met mechanische middelen of pesticiden en met vaste of mobiele geluidsbronnen ingrijpt op of in de onmiddellijke omgeving van natuurlijke en deels natuurlijke habitats of ecosystemen, op waterrijke gebieden, op natuurlijke en halfnatuurlijke vegetaties, op wilde inheemse fauna of flora of trekkende wilde diersoorten of hun respectieve habitats of leefgebieden, of op kleine landschapselementen, en die weet of redelijkerwijze kan vermoeden dat deze habitats, ecosystemen, waterrijke gebieden, vegetaties, fauna, flora of kleine landschapselementen daardoor kunnen worden vernietigd of ernstig geschaad, is verplicht om alle maatregelen te nemen die redelijkerwijze van hem kunnen worden gevegd om de vernietiging of de schade te voorkomen, te beperken of indien dit niet mogelijk is, te herstellen (VMM, 2014b).

2.1.2 Wettelijk kader in België

van gewasbeschermingsmiddelen naar watergebieden en bepaalde specifieke zones met verhoogd risico, zoals natuurreservaten en waterwingebieden (Leefmilieu Brussel, 2013).

Volgens deze nieuwe ordonnantie is het gebruik van alle pesticiden in openbare ruimten nog steeds verboden. De beheerder mag echter van dit verbod afwijken tot en met 31 december 2018 indien hij uiterlijk op 31 december 2014 de opstelling van een reductieplan kon voorleggen. Bepaalde pesticiden mogen in kwetsbare gebieden en in gebieden met een verhoogd risico toegepast worden als de volksgezondheid, de openbare veiligheid, het natuurbehoud of de bescherming van het plantaardige erfgoed in het gedrang komt (Gewestelijke Overheidsdienst Brussel, 2013).

Zowel in het Vlaams, het Waals en het Brussels Hoofdstedelijk Gewest moeten de wetten aangaande verhardingen opgevolgd worden door alle openbare diensten. Een openbare dienst wordt gedefinieerd als 'een dienst uitgevoerd door een rechtspersoon in het kader van een taak van algemeen belang'. Bijgevolg zijn niet enkel gemeentebesturen onderhevig aan deze wetten, ook alle openbare besturen die gevestigd zijn op het grondgebied van het gewest moeten aan de wetten voldoen. Ook scholen, ziekenhuizen, kinderdagverblijven en zorginstellingen worden hiertoe gerekend. Van deze openbare besturen zijn in Vlaanderen de belangrijkste het Agentschap Wegen en Verkeer (AWV) en de NMBS (VMM, 2011).

2.1.3. Geïntegreerd Onkruidbeheer

Bij de bestrijding van onkruiden kan men enerzijds preventieve en anderzijds curatieve maatregelen toepassen. Sinds het verbod op herbiciden, schenken openbare diensten steeds meer aandacht aan preventieve maatregelen. Hoewel de kosten om een bestaande verharding aan te passen hoog zijn (in de praktijk kost het uitbreken en heraanleggen van 1 m² voetpad met bijhorende kantsteen en straatgoot al gauw 250 – 300 euro (Groendienst Poperinge, mondelinge mededeling)), loont het toch zeker de moeite om bij de keuze van de materialen rekening te houden met hun onkruidwerend vermogen en met het toekomstige onkruidbeheer (Kempenaar *et al.*, 2006; Grundy, 2007), de aanleg van onkruidwerende verhardingen laat immers toe te besparen op dure curatieve ingrepen. De curatieve, niet-chemische alternatieven voor herbiciden zijn vaak duurder dan chemische bestrijding; behandelingen zijn frequenter nodig dan bij chemische bestrijding (Kristoffersen *et al.*, 2004) en curatieve niet-chemische methoden verbruiken vaak grote volumes brandstof, waardoor ze bijdragen tot het broeikas effect (Kempenaar *et al.*, 2007). Dit resulteert in een lagere kosten/baten ratio (Kempenaar *et al.*, 2007). Riemens *et al.* (2005) berekenden dat de alternatieven op jaarbasis al gauw drie tot vijf maal duurder zijn om toe te passen dan chemische middelen (zie Tabel 1).

Onkruiden zijn niet in alle omstandigheden even hinderlijk. Beheerders van verhardingen maken daarom gebruik van onkruidtolerantielimiets. Enkel bij overschrijding van dergelijke limieten wordt curatief ingegrepen. De mate waarin de beheerder onkruid tolereert hangt sterk af van de ligging en de functie van de verharding. Zo wordt onkruid minder getolereerd in stadscentra dan op het platteland, en zal de onkruidtolerantie op fietspaden anders zijn dan die op parkeervoorzieningen (Boonen *et al.*, 2013).

Tabel 1: Gemiddelde kostprijs van enkele curatieve bestrijdingssystemen voor "geringe onkruidgroei" (beeldscore 7 - 8⁵). Bij chemische bestrijding werd 25 % extra kost bijgeteld op jaarbasis voor de meerkost van werken volgens de DOB-richtlijnen. De gegeven prijzen zijn slechts indicaties omdat de kostprijs van onkruidbestrijding in de praktijk door veel factoren wordt beïnvloed (van Dijk & Kempenaar, 2012)

Systeem	Aantal behandelingen	Prijs (€ m ⁻²)	Kosten (€ m ⁻² jaar ⁻¹)
Borstelen	3 – 4	0.045	0.13 – 0.18
Branden	6 – 8	0.023	0.14 – 0.18
Hete lucht	6 – 8	0.024	0.15 – 0.19
Heet water	3 – 4	0.076	0.22 – 0.29
Chemisch	2 – 3	0.018	0.04 – 0.05

Een geïntegreerde beheersing van onkruid vereist kennis over de biologie van de aanwezige onkruidsoorten. Elke ecologische niche die de verharding biedt (goten, voetpaden, parkeerplaatsen, etc.), heeft immers zijn eigen gespecialiseerde begroeiing (Benvenuti, 2004; Fagot *et al.*, 2011; Hruska, 1995).

⁵ De beeldscore is een objectieve kwantificatie (schaal 2-10 met 2 als meest veronkruid) van de onkruidgroei op een verharding. Het is een weerspiegeling van de visuele perceptie van de burger met betrekking tot de netheid van de verharding (De Cauwer, 2015). Hierbij wordt rekening gehouden met de voegbedekking én met de vegetatiehoogte (Boonen *et al.*, 2013).

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

De onkruidflora kan sterk variëren naargelang de omgevingsfactoren. De volgende omgevingsfactoren beïnvloeden de aard en/of mate van veronkruiding:

- **gebruiksintensiteit:** een vaak betreden verharding zal eerder kleine onkruiden en onkruiden met een diepgelegen groeipunt huisvesten, terwijl weinig betreden verhardingen meer meerjarigen en grotere onkruiden huisvesten (Benvenuti, 2004; Boonen *et al.*, 2013). Het is bijgevolg belangrijk de verharding aan te leggen in functie van de verwachte betreding om later minder vaak curatief te moeten ingrijpen;
- **lichtintensiteit:** op beschaduwde plaatsen komen overwegend meer een- en tweejarige kruiden voor (Fagot *et al.*, 2011) en aangezien deze onkruiden makkelijker kunnen bestreden worden dan meerjarige kruiden (Hansson, 2002), zal curatieve onkruidbestrijding eenvoudiger zijn op beschaduwde verhardingen;
- aanpalende **groenzones** in de buurt van de verharding; een bomenrij bijvoorbeeld zal via afgevallen bladeren zorgen voor aanvoer van organisch materiaal. Een grasperk kan zaden overbrengen en de verharding zijdelings overgroeien (Boonen *et al.*, 2013).

2.1.3.1. Preventieve maatregelen

Preventieve maatregelen omvatten een onkruidwerend ontwerp en uitvoering van de verharding en een goede materiaalkeuze. Om onkruidwerend te zijn, dient een verharding aan al deze voorwaarden te voldoen. Een goede verharding moet daarnaast voldoen aan aspecten zoals opbreekbaarheid en waterdoorlaatbaarheid, en aangepast zijn aan de verwachte verkeersbelasting (Riemens *et al.*, 2005).

Op basis van verschillende omgevingsfactoren (verkeersbelasting, veronkruidingsrisico, voegbreedte, gebruiksintensiteit) en factoren aangaande materiaalvoorkeuren (waterdoorlatend of niet) werd door Boonen *et al.* een beslisboom ontworpen om tot een geschikte materiaalcombinatie te komen. De beslisboom kan ook gebruikt worden om te bepalen of voor een bestaande verharding onkruidbestrijding, hervoegen of heraanleggen aangewezen is (Boonen *et al.*, 2013).

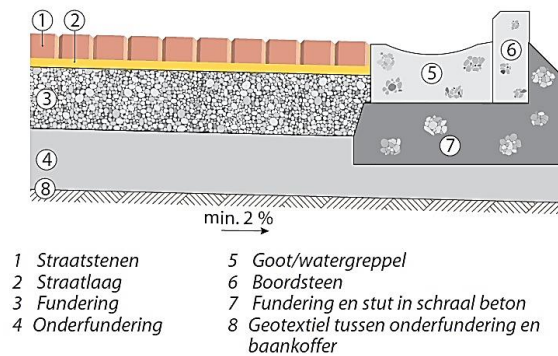
2.1.3.1.1. Ontwerp en uitvoering

In 1997 publiceerde het Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek (kort: CROW) een ideeënboek voor onkruidwerende constructies van elementverhardingen. In dit ideeënboek wordt dieper ingegaan op welke materialen best gebruikt worden en met welke factoren rekening moet gehouden worden bij de (her)aanleg van een verharding (Riemens *et al.*, 2005; CROW, 1997).

Ook in de “Handleiding voor niet-chemisch(e) onkruidbeheer(sing) op verhardingen met kleinschalige elementen” van Boonen *et al.* (2013) zijn erg veel aanbevelingen terug te vinden om een onkruidwerend ontwerp op te stellen. Om te bepalen welk ontwerp gebruikt moet worden in een specifieke *in situ* situatie, moet vooraf het veronkruidingsrisico ingeschat worden. Dit risico wordt uitgedrukt als een score op een schaal van 0 (geen risico) tot 1 (hoogste risico). Het veronkruidingsrisico wordt bepaald aan de hand van een score voor het ontwerp (de ontwerpscore), een score voor de voegbreedte en een score voor de gebruiksintensiteit. Een laag veronkruidingsrisico wordt bekomen bij goed onkruidwerend ontwerp, smalle voegbreedte en hoge gebruiksintensiteit (Boonen *et al.*, 2013).

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

De conventionele opbouw van een steenbestrating is weergegeven in Figuur 1. Voor voetpaden en andere verhardingen worden gelijkaardige opbouwen gebruikt.



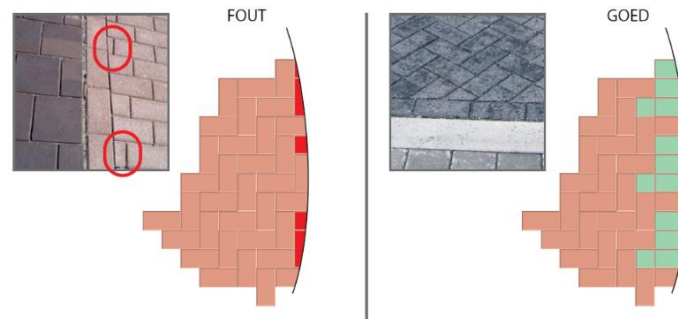
Figuur 1: Standaard opbouw van een steenbestrating (Keymeulen *et al.*, 2009)

2.1.3.1.1.1. Ontwerpscore

Hierna volgen de voornaamste ontwerpkenmerken waarvan uit onderzoek bleek dat ze een groot effect hebben op de onkruidgroei (Boonen *et al.*, 2013).

Zoals reeds hoger werd aangehaald, is er een grote invloed van **aanliggend groen** op veronkruiding. Dit komt enerzijds door de aanvoer van organisch materiaal als voedingsbodem voor onkruiden, en anderzijds door ingroei vanuit de aanliggende vegetatie. Om onkruidgroei door deze factor preventief tegen te gaan, kiest men best voor smalle voegen met een voegvulling die moeilijk vervuilt en onkruidwerend is. Aangezien een streng veegbeheer hier aangewezen is, wordt best gekozen voor straatstenen die hiertegen bestendig zijn. Een stevige kantopsluiting (zie verder) is aangewezen (Boonen *et al.*, 2013).

Om tot een goede **kantopsluiting** te komen, worden geen stukken steen kleiner dan een halve steen gebruikt (zie Figuur 2). Bovendien wordt liefst een enkele of dubbele rij volle stenen tegen kantopsluitingen en singuliere punten zoals putdeksels gelegd. Eventueel kunnen passtukken zoals bisschopsmutsen gebruikt worden om een goede aansluiting te verzekeren (Keymeulen *et al.*, 2009). Slechte randafwerking zorgt voor verbreden van de voegen en putvorming, wat onkruidgroei bevordert (Boonen *et al.*, 2013).



Figuur 2: Illustratie van een foute (links) en goede (rechts) randafwerking (Keymeulen *et al.*, 2009)

Verzakkingen en oneffenheden zorgen voor opstapeling van vocht en organisch materiaal en bijgevolg voor onkruidgroei (VELT, 2003). Verzakkingen kunnen ontstaan door een gebrekkige afwatering en

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

door te zwaar verkeer (ook zware machines voor curatieve bestrijding) (zie 2.2.2.1 en 2.2.2.2). Een goede waterafvoer is dus belangrijk, evenals een juiste dikte van de straatstenen, straatlaag en (onder)fundering om de verkeersbelasting te kunnen torsen (Boonen *et al.*, 2013). Oneffenheden kunnen bij de aanleg reeds vermeden worden door de verharding na invoegen aan te trillen (Keymeulen *et al.*, 2009). Zo wordt de straatsteen bovendien stevig vastgezet in de straatlaag en wordt het voegvullingsmateriaal gecompacteerd, waardoor het minder eenvoudig doordringbaar is door plantenwortels.

Onder **obstakels** worden straatmeubilair, verkeersborden, verlichtingspalen, etc. gerekend. Rond deze obstakels is typisch een lagere gebruiksintensiteit waardoor ze vatbaarder zijn voor onkruidgroei (Kempenaar *et al.*, 2006). Daarbij komt nog dat de verharding errond moeilijker bereikbaar is voor curatieve methoden. Om problemen met onkruiden rond obstakels te vermijden, kunnen de obstakels zo ontworpen worden dat ze verwijderd kunnen worden tijdens de toepassing van curatieve onkruidbestrijding. Een andere oplossing is om de obstakels indien mogelijk in een aanliggende groenstrook te plaatsen (De Cauwer, 2013) of ze tot een minimum te beperken (bv. verschillende verkeersborden op één paal bevestigen etc.) (DOB, 2008). Steeds is het aanbevolen om de afwerking rond de obstakels zeer zorgvuldig uit te voeren en gebruik te maken van geschikte mortels en passtukken om een goede aansluiting te bekomen (Boonen *et al.*, 2013).

De aanwezigheid van een **kantsteen** ("6" in Figuur 1) is noodzakelijk om de straatstenen goed op te sluiten en uitspoeling van straatlaag en voegvulling tegen te gaan. Kantstenen voorkomen wegglijden of kantelen van de straatstenen, zowel tijdens aanleg als tijdens de ingebruikname. Voorwaarde hiervoor is wel dat de kantsteen voldoende zijdelings gestut wordt (Boonen *et al.*, 2013). Zelfs bij overgang naar een andere verharding is een kantopsluiting aangewezen om beweging te vermijden ten gevolge van een vervorming in de aangrenzende verharding (Keymeulen *et al.*, 2009). Bij afwezigheid van een kantopsluiting zullen de stenen door belasting en onkruidgroei uiteen kunnen gedreven worden, waardoor de voegen verbreden. Zo heeft de aanwezigheid van een kantopsluiting indirect een impact op onkruidgroei. Om het curatieve onkruidbeheer te vergemakkelijken, worden best zo weinig mogelijk niveauverschillen gecreëerd. Om deze reden, en om windluwe zones waar materiaal kan opstapelen te vermijden, is het aangeraden om afgeschuinde kantstenen te gebruiken (Boonen *et al.*, 2013).

Straatgoten ("5" in Figuur 1) verzamelen al het afstromende water en de organische vervuiling die dit water meedraagt. Deze goten zijn bijgevolg gevoeliger voor veronkruiding dan andere plaatsen van een verharding. Door geprefabriceerde betonelementen te gebruiken in plaats van straatstenen, wordt het voegpercentage sterk gereduceerd en daarmee ook het risico op onkruidgroei. De straatgoten zelf liggen 3 tot 6 mm dieper dan het wegdek, dit is vooral belangrijk voor een goede afwatering (Keymeulen *et al.*, 2009). De aanwezige voegen worden best gevuld met een waterdichte en krimprijke voegvulling (Boonen *et al.*, 2013).

2.1.3.1.1.2. Voegbreedte

De voegbreedte wordt door verschillende van hierboven besproken factoren beïnvloed. Onderzoek van De Cauwer *et al.* (2013) toonde aan dat brede voegen meer veronkruid zijn dan smalle voegen. Uit datzelfde onderzoek bleek dat vervuilde voegen 17 tot 647 % meer onkruidgroei vertonen dan onvervuilde als het brede voegen betreft. Vervuilde smalle voegen hebben ook meer onkruidgroei, maar het verschil is hier minder uitgesproken (De Cauwer *et al.*, 2013a). De beeldscore, de

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

voegbedekking en de plantendiversiteit zijn respectievelijk lager, lager en hoger bij brede voegen, wat wil zeggen dat er zichtbaar meer en diversere plantengroei aanwezig is op verhardingen met brede voegen (Fagot *et al.*, 2011).

Op plaatsen waar een uitzicht van een verharding met voegen gewenst is, maar er een te groot risico is op veronkruiding, kan een asfalt- of betonprint gebruikt worden. Dit kan nuttig zijn op plaatsen met weinig betreding (zoals verkeersgeleiders) en moeilijk bereikbare plaatsen (wegens bv. straatmeubilair) (Riemens *et al.*, 2005).

2.1.3.1.1.3. Gebruiksintensiteit

Betreding van een verharding (zowel door voetgangers als door voertuigen) kan gezien worden als de goedkoopste en makkelijkste manier van onkruidbestrijding. Betreding zorgt voor een onkruidshift naar kleinere onkruiden en onkruiden met diepgelegen groeipunten (Benvenuti, 2004), maar zorgt ook voor een lagere onkruiddruk van de overblijvende soorten (Fagot *et al.*, 2011). Het is dan ook van belang om bij het ontwerpen of vernieuwen van een verharding rekening te houden met de verwachte gebruiksintensiteit en de breedte of grootte van de (onderdelen van de) verharding hierop af te stemmen. Op die manier kan een voldoende hoge gebruiksintensiteit onkruidgroei verhinderen (VELT, 2003).

Het Agentschap Wegen en Verkeer heeft voor de meest voorkomende verhardingstypes een overzicht gemaakt van de gewenste voegbreedte, de dikte van de verharding, het materiaal van het wegbed en de bijhorende voegvulling. Een tabel die deze gegevens samenvat is te vinden in Bijlage 1.

2.1.3.1.2. Materiaalkeuze

Naargelang de gewenste waterdoorlatendheid, het veronkruidingsrisico en het vereiste draagvermogen zullen andere straatstenen verkozen worden, gaande van normale betonklinkers en poreuze betonstraatstenen tot straatstenen met drainageopeningen, stenen met bredere voegen en grasbetontegels. De Cauwer *et al.* onderzochten in 2013 de onkruidwerendheid van enkele straatstenen en concludeerden dat stenen met drainage-openingen het meest onkruidgroei⁶ vertoonden (4.56 ± 0.213 %), gevolgd door stenen met bredere voegen (2.66 ± 0.126 %) en conventionele betonstenen (2.10 ± 0.294 %). Poreuze stenen vertoonden het minst onkruidgroei; slechts 0.75 ± 0.101 %. Wel was de relatieve mosgroei op de poreuze stenen aanzienlijk groter (33.1 ± 3.64 % t.o.v. 0 tot 3 % voor andere stenen) (De Cauwer *et al.*, 2013b). Deze mosgroei is vermoedelijk te wijten aan de hogere porositeit van het oppervlak.

Het materiaal waaruit de **straatsteen** gemaakt is (beton, klei, natuursteen) heeft weinig tot geen invloed op de beeldscore. Het voegbedekkingspercentage is echter veel groter bij kleiklinkers dan bij betonstraatstenen (Fagot *et al.*, 2011).

De keuze van de straatsteensoort bepaalt ook de voegbreedte en het voegpercentage, die – zoals hoger vermeld – een belangrijke invloed hebben op het veronkruidingsrisico. Het is dus belangrijk de straatsteensoort af te stemmen op het veronkruidingsrisico (Boonen *et al.*, 2013).

⁶ Percentages staan voor oppervlakte-%

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

De Cauwer *et al.* (2013) toonden aan dat een ontwerp met poreuze stenen of een ontwerp met nauwe voegen kan leiden tot 84 % minder onkruidbedekking dan een ontwerp met brede voegen. Bovendien bevatten de verhardingen met niet-poreuze stenen 50 % meer meerjarige planten, een soortengroep die die moeilijker te bestrijden is.

De **straatlaag** zorgt ervoor dat de straatstenen goed vastzitten en dat verschillen in steendikte opgevangen worden zodat een effen verharding bekomen wordt. Daarnaast is de straatlaag uitermate belangrijk om infiltratiewater door te laten stromen naar onderliggende lagen om putvorming te vermijden. Om zijn functie te kunnen blijven uitoefenen, moet een straatlaag gemaakt zijn van een goed materiaal; te zachte materialen zullen onder de verkeersbelasting vergruizen. Kwaliteitsvolle materialen zijn bijvoorbeeld split van porfier, zandsteen of kwarts (Boonen *et al.*, 2013). Voor betonstraatstenen is een straatlaagdikte van 3 cm aangewezen. Indien met gebakken straatstenen wordt verhard, moet een dikte van minstens 4 cm aangehouden worden. Te dunne straatlagen kunnen verschillen in steendikte onvoldoende opvangen en kunnen niet snel genoeg afwateren, terwijl te dikke straatlagen ook voor verzakkingen en spoorvorming kunnen zorgen (Fvb-ffc Constructiv, 2012).

De straatlaag oefent een directe invloed uit op de mate van veronkruiding. Straatlagen die minder kleine bestanddelen hebben, houden minder water vast waardoor onkruiden over minder plantbeschikbaar water beschikken (Beeldens & Boonen, 2011). Plantenwortels dringen immers snel door tot in de straatlaag. Onderzoek heeft dan ook uitgewezen dat verhardingen met open straatlagen na verloop van tijd minder veronkruiding vertonen dan deze met een gesloten straatlaag (De Cauwer *et al.*, 2013a). De korrelgrootteverdeling van het materiaal van de open straatlaag en die van het bovenliggende voegvullingsmateriaal dienen op elkaar afgestemd te zijn om te voorkomen dat het voegvullingsmateriaal verdwijnt in de onderliggende straatlaag (Keymeulen *et al.*, 2009).

Als alternatief kan ook een niet-geweven geotextiel tussen de lagen worden aangebracht. Dit textiel zal de korrels verhinderen uit te spoelen (Boonen *et al.*, 2013).

Ook de keuze van het **voegvullingsmateriaal** is van cruciaal belang voor de onkruidwerendheid van een verharding. Een uitgebreide bespreking van de verschillende voegvullingsmaterialen komt aan bod in sectie 2.2.1.

2.1.3.2. Curatieve maatregelen

Bij een goede geïntegreerde bestrijding worden curatieve maatregelen pas toegepast als preventieve middelen ontoereikend zijn. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen chemische en niet-chemische bestrijdingsmethoden. De niet-chemische methoden omvatten voornamelijk vegen, borstelen, branden, heet water en stomen. Bij deze niet-chemische curatieve methoden is de timing uiterst belangrijk voor een goede effectiviteit (Melandar *et al.*, 2009). Fagot *et al.* (2011) toonden aan dat het langdurig gebruik van slechts één bestrijdingsmethode leidt tot een shift in de onkruidflora van een soortendiverse flora naar een eenzijdige flora bestaande uit tolerantere soorten. Toepassing van een combinatie van methodes is dus aangewezen om selectiedruk zoveel mogelijk te beperken (De Cauwer *et al.*, 2013b).

2.1.3.2.1. Chemische onkruidbestrijding

Chemische bestrijding op openbare terreinen is bij wet verboden sinds 1 januari 2015, enkel in uitzonderlijke gevallen mag nog een herbicide ingezet worden. Het meest gebruikte herbicide was (en is nog steeds bij particulieren) het systemisch bladherbicide glyfosaat, dat de meeste plantensoorten

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

met slechts één of twee toepassingen doodt. Nadeel van chemische onkruidbestrijding is dat de plantenresten vaak achteraf niet worden afgevoerd, waardoor ze een voedingsbodem vormen voor verdere veronkruiding en men zo in een vicieuze cirkel terechtkomt (Riemens *et al.*, 2005; Kempenaar *et al.*, 2007). Eenzijdig chemisch wieden zorgt voor een aanrijking aan mossen in het onkruidbestand t.o.v. mechanisch of thermisch wieden (Fagot *et al.*, 2011).

2.1.3.2.2. Mechanische onkruidbestrijding

Regelmatig **vegen**, bij voorkeur gecombineerd met opzuigen van het veegafval, behoort eigenlijk eerder tot de preventieve maatregelen. Het voorkomt namelijk dat een geschikte voedingsbodem gevormd wordt, waardoor onkruidgroei vermeden wordt (Hansen *et al.*, 2004; Hein, 1990). Onderzoek van Kempenaar en Rutgers toonde aan dat vegen bij niet-chemische bestrijding niet enkel financieel voordelig is indien minstens 4x per jaar wordt geveegd, maar dat bij 12x per jaar vegen amper nog aanvullende onkruidbestrijding vereist is (Kempenaar & Rutgers, 2009).

Borstelen verschilt van vegen in die zin dat het curatiever is. Bij borstelen gebruikt men immers hardere borstels, gemaakt van staaldraadbundels of staaldraadlamellen (dus geen polypropyleen zoals bij veegborstels), die de bovengrondse plantendelen mechanisch verwijderen. Vaak gebruikt men horizontaal of verticaal roterende borstels (Hein, 1990). Borstelen wordt gezien als de energie-efficiëntste niet-chemische curatieve methode, maar vaak treedt er beschadiging op aan het oppervlak waardoor het op lange termijn minder effectief is (Kempenaar & Spijker, 2004). Daarnaast wordt er ook voegvullingsmateriaal verwijderd (Boonen *et al.*, 2013) door het borstelen en zorgt het voor geluidsoverlast; volumes van > 90 dB zijn niet ongevoelbaar (Kortenhoff *et al.*, 2001a). Bij eenzijdig mechanisch wieden wordt het aandeel meerjarige monocotylen in het totale onkruidbestand vergroot in vergelijking met thermisch wieden (Fagot *et al.*, 2011).

2.1.3.2.3. Thermische onkruidbestrijding

Bij thermische onkruidbestrijding wordt het bovengrondse plantenweefsel door middel van convectie, conductie, condensatie of straling opgewarmd, waarna het bovengrondse plantenweefsel afsterft (De Cauwer, 2011). Bij alle thermische methoden bestaat er een dosis-responsrelatie tussen de toegediende energie en de afdoding. De aan de plant toegediende energie wordt voornamelijk bepaald door de rijsnelheid en de energieafgifte per tijdseenheid (Rask & Kristoffersen, 2007). Om plantenweefsels te doden, dienen ze verhit te worden tot boven de letale weefseltemperatuur (ongeveer 58°C) (De Cauwer, 2011). Subletale temperaturen zullen niet resulteren in de gewenste coagulatie van membraanewitten maar zullen de groei wel remmen. Fagot *et al.* (2011) rapporteerden dat thermisch wieden een betere beeldscore opleverde dan mechanisch wieden (8.62 ± 0.183 t.o.v. 7.77 ± 0.378), chemisch wieden was desondanks nog beter (9.00 ± 0.297). Eenzijdige toepassing van thermische methoden resulteerde in meer eenjarige monocotylen dan mechanisch of chemisch wieden (Fagot *et al.*, 2011).

Branden is de populairste thermische methode om onkruiden te bestrijden. Bij het branden stijgt de temperatuur onder de branderbak tot ongeveer 900°C. De onkruiden worden hierdoor via convectie opgewarmd tot 75 - 90°C, wat voldoende is om de bovengrondse delen volledig te doden. Bij de moderne generatie branders wordt een stootbrander gecombineerd met infraroodstralers (VELT, 2003). Het grote nadeel van branden is het brandgevaar, waardoor de methode niet meer wordt gebruikt op terreinen waar het risico op brand te groot is (Hansson, 2002).

2.1.3 Geïntegreerd Onkruidbeheer

Bij **heet water** toepassing wordt water van 98°C op de plant aangebracht. Hierbij wordt de warmte van het water via geleiding naar het plantenweefsel overgebracht (De Cauwer, 2011). Om de warmte langer vast te houden, worden vaak additieven aan het water toegevoegd die een isolerende schuimlaag vormen. Onderzoeken van Hansson (2002) en De Cauwer *et al.* (2014) hebben uitgewezen dat heet water het energie-efficiëntst toegepast wordt als de relatieve waterinhoud van de plant laag is en de plant nog jong is. Heet water heeft een aantal belangrijke troeven t.o.v. overige niet-chemische technieken: het kan toegepast worden in omstandigheden waar branden te gevaarlijk is en het kan plaatsspecifiek toegepast worden gebruikmakend van onkruiddetectie-sensoren waardoor energie bespaard kan worden (Rask & Kristoffersen, 2007) (Hansson & Ascard, 2002).

Bij **stomen** wordt stoom van net boven 100°C toegediend. De warmteoverdracht geschiedt door middel van condensatie (De Cauwer, 2011). Het grote voordeel van stomen ten opzichte van heet water is dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt aanzienlijk hoger is waardoor veel minder water vereist is voor eenzelfde effect (Hansson, 2002). Het grote nadeel van stomen is dat veel stoom en dus energie verloren gaat door de volatiliteit van de stoom. Lefevre *et al.* (2001) voerden een onderzoek uit naar verschillende curatieve methoden en stomen bleek de enige methode te zijn die jaarlijks zo weinig toepassingen nodig had als glyfosaatbehandeling. Dit is in tegenspraak met onderzoek van Rask *et al.* (2013) waaruit de heet water techniek efficiënter bleek dan de stoomtechniek. De reden dat stomen desondanks minder populair is dan veel andere methoden is de hoge aanschafkost van de apparatuur (Lefevre *et al.*, 2001).

Naast de bovengenoemde methoden, die het meest toegepast worden en waarnaar ook het meest onderzoek wordt gedaan, zijn er nog andere curatieve methoden beschikbaar. De populairste alternatieven zijn zeven, maaien, elektrocutie, infraroodtechnieken, microgolven, zandstralen en vriezen. De meeste van deze technieken blijken vaak niet breed genoeg inzetbaar of zijn op heden kosten-inefficiënt (De Cauwer, 2013).

2.2. Gevalstudie: voegvullingen voor bestratingen met kleinschalige elementen

2.2.1. Indelingswijze van voegvullingen

De verschillende soorten voegvullingen worden doorgaans ingedeeld in drie klassen; de klassieke ongebonden materialen, de klassieke gebonden materialen en de innovatieve materialen. Uit welke klasse best een materiaal gebruikt wordt, hangt af van situatie tot situatie.

2.2.1.1. Klassieke ongebonden materialen

Klassieke ongebonden materialen zijn de gebruikelijke materialen waarmee voegen gevuld worden. Deze materialen worden onderverdeeld volgens de korrelgrootte in fijnkorrelige (met korreldiameter < 2 mm) en grofkorrelige (met korreldiameter > 2 mm) voegvullingen. Voegvullingen verschillen niet alleen in korrelgrootteverdeling maar ook in gebruikt mineraal (o.a. kwarts, kalk, porfier), korrelvorm (rond of hoekig) en kleur. Fijnkorrelige materialen zijn doorgaans zanden – al dan niet kunstmatige – zoals wit kwartszand, zwart kwartszand, kalksteen of zeezand met korrelgrootte 0/1 of 0/2. Tot de grofkorrelige materialen wordt de fijne steenslag gerekend (bijvoorbeeld porfier of kalksteen met korreldiameter 0/6.3 of 2/6.3) (Boonen *et al.*, 2013).

Fijnkorrelige klassieke ongebonden materialen worden bij voorkeur gebruikt in smalle voegen (< 5 mm) terwijl grovere materialen best worden toegepast op verhardingen met bredere voegen (5 - 8 mm), zoals in keibestratingen of op verhardingen met drainageopeningen. Deze materialen zijn steeds waterdoorlatend en zorgen voor een flexibele voeg. Bij voorkeur worden materialen gebruikt met hoekige korrels omdat deze een betere samenhang vertonen. Zand dat werd afgezet door de zee of uit woestijnen afkomstig is, vertoont vaak meer afronding door de sterke erosie die het ondergaan heeft. Rivierzand is eerder hoekig van vorm (Boonen *et al.*, 2013).

De korrelgrootte wordt in grootte beperkt door de voegbreedte; optimaal heeft een voegvulling een maximale korrelgrootte van 0.8 maal de voegbreedte, met een maximale voegbreedte van 8 mm (Keymeulen *et al.*, 2009). De korrelgrootteverdelingsklassen kunnen verder worden ingedeeld op basis van de gemiddelde korrelgrootte μ en de bijbehorende spreiding σ van de korrelgrootteverdelingskromme. Zo bekomt men:

- Klasse 1: kleine μ en σ ;
- Klasse 2: kleine μ , grote σ ;
- Klasse 3: grote μ en σ ;
- Klasse 4: grote μ , kleine σ .

Hierbij werden μ en σ met de volgende formules berekend:

$$\mu = \sum d_i \times z_i$$

$$\sigma^2 = \sum (d_i - \mu)^2 \times z_i$$

2.2.1 Indelingswijze van voegvullingen

met: d_i = korreldiameter in mm

z_i = zeefrest voor d_i

2.2.1.2. Klassieke gebonden materialen

Tot de klassieke gebonden materialen rekenen we met kalk of cement gebonden mortels (Boonen *et al.*, 2013). Deze klassieke gebonden materialen vormen een lucht- en waterdichte laag. In deze voegvullingen is het bijgevolg erg moeilijk voor kiemende planten om zich te vestigen.

Hoewel deze gebonden materialen erg onkruidwerend lijken te zijn, moeten er toch enkele nadelen vermeld worden. Door rond het nulpunt fluctuerende temperaturen kunnen er barsten ontstaan door de vorst- en dooicycli, waarop organisch materiaal in de barsten kan opstapelen en onkruidgroei toch kan optreden. Daarnaast kunnen deze mortels maar moeilijk gebruikt worden om smalle voegen te vullen. Ze worden dus vooral ingezet bij brede voegen en om grote openingen zoals ruimtes rond straatmeubilair op te vullen (5 - 30 mm). Ten derde zijn ze – zoals reeds vermeld – waterdoorlatend, wat een probleem kan vormen omtrent waterafvoer als te grote oppervlakken ermee gevoegd worden (Boonen *et al.*, 2013).

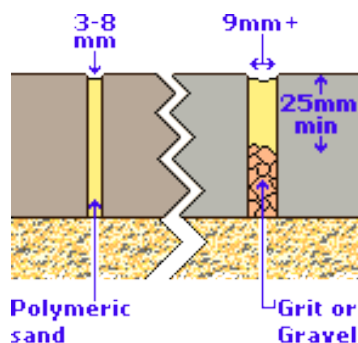
Omdat de gebonden klassieke materialen verschillende nadelen vertonen, worden ze slechts in enkele situaties gebruikt, zoals verhardingen met brede voegen die een hoog veronkruidingsrisico hebben of waar absolute nultolerantie ten aanzien van onkruidgroei geboden is (Boonen *et al.*, 2013).

2.2.1.3. Innovatieve materialen

Er bestaan verschillende innovatieve materialen die speciaal ontwikkeld werden om onkruidgroei tegen te gaan. Hun precieze werking ten aanzien van onkruidgroei berust doorgaans op hun chemische eigenschappen; vaak bezitten ze een extreem lage of hoge pH, hebben ze een erg hoog zoutgehalte en/of is er een tekort aan een cruciaal element voor plantengroei. Ook de korrelgrootte wordt door fabrikanten gebruikt om optimale onkruidbestrijding te verwezenlijken (De Cauwer *et al.*, 2014). Veelal is er een gebrek aan data omtrent de precieze samenstelling van de producten en hun eventuele fytotoxische componenten. Vele fabrikanten zijn ook niet bereid dergelijke informatie aan te leveren.

Omdat de innovatieve materialen erg uiteenlopende eigenschappen hebben, is het niet mogelijk te zeggen voor welke voegbreedtes innovatieve materialen in het algemeen het meest geschikt zijn (zie Tabel 3). Soms worden materialen uit deze klasse gebruikt voor voegen van 1 - 2 mm, die té dun zijn voor klassieke materialen, maar ook voor erg brede voegen (tot zelfs 50 mm) kan voorkeur gegeven worden aan deze materialen omdat conventionele voegvullingsmaterialen hier onvoldoende onkruidwerend zijn. Als innovatieve materialen gebruikt worden bij brede voegen, is vaak niet de volledige voegdiepte met het innovatief materiaal gevuld omwille van hun prijskaartje. Doorgaans wordt slechts de bovenste laag met het innovatief materiaal gevuld en kiest men voor de onderste laag voor een goedkoper klassiek ongebonden materiaal (zie Figuur 3).

2.2.1 Indelingswijze van voegvullingen



Figuur 3: Bij brede voegen wordt het onderste deel van de voeg vaak gevuld met een goedkoper materiaal (McCormack, 2015)

De innovatieve materialen omvatten een breed spectrum aan voegvullingen. Er kan op vele manieren getracht worden een indeling te maken tussen de materialen, die qua eigenschappen erg ver uit elkaar kunnen liggen. Een universeel gebruikte standaardindeling bestaat echter nog steeds niet. Voor keramische tegels is er een indeling voorhanden (volgens norm NBN EN 13888 *Mortels voor keramische tegels*) op basis van de wijze waarop de binding gebeurt, maar keramische tegels hebben maar een beperkte dikte en staan niet bloot aan zware belasting zoals dit wel het geval kan zijn met bijvoorbeeld betonstraatstenen. Bijgevolg kan deze indeling niet gebruikt worden voor alle verhardingen (OCW, 2014b). In dit werk zullen we volgende indeling – op basis van de wijze waarop de modificatie uitgevoerd werd – aanhouden:

- Met zout aangerijkte zanden;
- Polymeerzanden;
- Harsgebonden mortels;
- Joint sealers;
- Met polymeren gemodificeerde mortels;
- Experimentele materialen.

Bij de met **zout aangerijkte zanden** tracht men onkruidgroei chemisch te verhinderen of te remmen door in te spelen op de pH, de zoutconcentratie en essentiële macro- (kalium en magnesium in het bijzonder) en micro-elementen (De Cauwer *et al.*, 2014). Zoutaangerijkte zanden worden vooral toegepast in smalle voegen, ze zijn slechts beperkt waterdoorlatend. Het gebruikte zand is bij voorkeur erg kwartsrijk en bevat lage concentraties aan voor plantengroei essentiële elementen als kalium en magnesium. Deze zanden bevatten 0.5 tot 10 % (op gewichtsbasis) natriumrijke additieven (Leopoldseider, 2011). De volgende natriumhoudende additieven worden toegepast: natriumsilicaten (zogenaamd waterglas), natrium-aluminumsilicaten (bv. de natuurlijke mineralen nefelien, analciem, sodaliet) en industriële bijproducten of afvalproducten (o.a. fijn vergruisd glas) (Frederiksen *et al.*, 2007). Het natriumrijk additief stelt geleidelijk natrium vrij als het in contact komt met water, tegelijkertijd stijgt de pH van het water door de opname van protonen (PF& U Mineral Development ApS, 2004). Daarnaast bevatten zoutaangerijkte zanden materialen met een hoge kationuitwisselingscapaciteit zoals bv. zeolieten (PF& U Mineral Development ApS, 2004). Dergelijke stoffen houden natrium vast in de voegvulling en verzekeren een hoge mate van natriumvrijstelling gedurende een lange tijd. Deze stoffen kunnen – met hun uitwisselingssites verzadigd met natrium – veel of zelfs al het natriumrijk additief vervangen. Hoe rijker het zand is aan kwarts, hoe minder essentiële elementen zoals kalium en magnesium het bevat (PF& U Mineral Development ApS, 2004).

2.2.1 Indelingswijze van voegvullingen

De onkruidwerendheid van dergelijke zoutaangerijkte zanden berust hoofdzakelijk op Na-toxiciteit en opwekken van fysiologische droogte (zie 2.2.3.2).

Tot de **polymeerzanden** worden producten zoals Eco Fugensand® en Techniseal® DR+ gerekend. Deze zanden hebben een polymere bindstof die er reeds vooraf in vermengd zit, en harden uit nadat ze besproeid worden met water. Naast de polymere bindstof kunnen nog andere stoffen aan het zand toegevoegd worden zoals bv. CaOH om de pH te beïnvloeden (Envirobond, 2011) en de binding te versterken (Beamix, 2013). De polymeren worden industrieel geproduceerd (synthetische polymeren zoals polybutadieen (Paving expert, 2015)) of zijn van natuurlijke oorsprong (natuurlijke polymeren) bv. polysacchariden geëxtraheerd uit zaadhuiden van *Plantago arenaria* of *Plantago ovata*, ook gekend onder de naam *Psyllium* (Leopoldseder, 2011). De polysacchariden in bv. *Plantago arenaria* zijn een mengsel van o.a. xylose, galactose en arabinose (Erskine & Jones, 1956). Een nadeel van de polymeren met natuurlijke oorsprong is dat er biodegradatie optreedt vanwege hun natuurlijke aard (GTX, 2007), al beweren sommige fabrikanten dat ze dit probleem sterk hebben kunnen terugdringen in hun product (Stones, 2015). Het grote voordeel voor natuurlijke polymeren is dat indien ze met water in contact komen, ze plastisch worden en zo een zekere waterdoorlatendheid hebben (OCW, 2014b). De synthetische polymeren bezitten deze eigenschap niet (GTX, 2007). Het plastisch worden is nuttig omdat het materiaal – in tegenstelling tot harsgebonden mortels – zo zelf scheuren herstelt, wat de onkruidwerendheid ten goede komt (OCW, 2013). Polymeerzanden worden gebruikt in voegen met een breedte tot 20 mm.

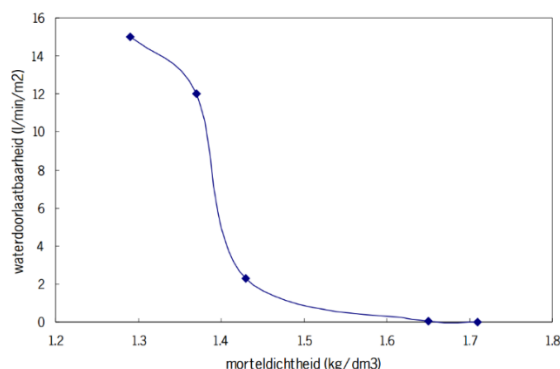
Harsgebonden mortels (“reaction resin grouts”) zijn de mortels waarvan harsen⁷ voor de binding zorgen. Deze gebonden voegvullingen dienen vooral voor bredere voegen, van 5 tot 30 mm breed. Bij deze producten wordt zand met een gekalibreerde korrelgrootte gebruikt. Het zand moet vaak nog ter plekke worden gemengd met één of twee componenten die zorgen voor het uitharden. Indien twee componenten toegevoegd worden zoals bij Rompox® D1, zijn dit enerzijds de moleculen die vernetten (dit kunnen bv. bisfenolen zijn (IGG, 2012)) en anderzijds een “curing agent” oftewel vernetter (bv. mono-anhydrides) die de vernetting⁸ initieert (Luft, 1961). Bij deze methode werd het zand niet speciaal behandeld, behalve een selectie op korrelgrootte. Als er slechts één product toegevoegd wordt zoals bij Streetprotexion® I, is dit de vernetter. In dit geval werd het zand vooraf gecoat met de harscomponent (Paving expert, 2015). Andere producten zoals Jointex® Easy Joint werden vooraf reeds gemengd en kunnen aangekocht worden in vacuüm verpakkingen.

Gebruikte harsen zijn vaak epoxyharsen. Bij harsgebonden mortels wordt veel geëxperimenteerd met de samenstelling. Als de morteldichtheid groter is, mag de verkeersbelasting immers groter zijn en verhoogt bovendien de weerstand tegen veeg- en borstelmachines. Een nadeel van een hogere dichtheid is dat de waterdoorlaatbaarheid daalt (zie ook Figuur 4) (Boonen *et al.*, 2013).

⁷ Harsen zijn een groep polymeren die behoren tot de thermoharders, wat betekent dat ze bij hoge temperatuur gevormd worden en daarna niet meer kunnen smelten (Wildschut, 1960). Ze verschillen hierin van de polymeren gebruikt in polymeerzanden, die thermoplasten zijn en dus wel enige plasticiteit vertonen (Oosterbrink, 2015).

⁸ Vernetten (Engels: “cross-linking”) is het vormen van dwarsverbindingen tussen polymere ketens waardoor een driedimensionale netwerkstructuur bekomen wordt (Oosterbrink, 2015).

2.2.1 Indelingswijze van voegvullingen



Figuur 4: Relatie tussen de waterdoorlaatbaarheid en de morteldichtheid van met epoxyharsen gebonden mortels (DOB, 2008)

Joint sealers gebruiken andere polymeren dan harsen om de voeg te verharden. Hier wordt het gekalibreerde wit zand eerst in de voegen geveegd, gevolgd door een eenmalige bespuiting met een dispersie. De dispersie bevat polymere stoffen zoals acrylaten (Leopoldseder, 2011). De dispersie zal zorgen voor een gedeeltelijke binding van het zand en een waterafstotend effect. Joint sealers zijn geschikt voor smalle voegen (< 5 mm) waar mortels niet gebruikt kunnen worden.

Met polymeren gemodificeerde mortels zijn gelijkaardig aan bovenstaande polymeergebonden mortels, maar halen hun bindende kracht nog steeds uit bv. cement. De bijgevoegde polymeren (doorgaans niet-reactieve harsen) bedragen 5 tot 20 % van het cementgewicht (AWV, 2014). De polymeren worden aan de mortel toegevoegd omdat ze enkele eigenschappen van het geheel beïnvloeden (harden, hanteerbaarheid, adhesie, duurzaamheid en sterkte). Bij deze voegvullingen dient het cement dus als matrix (het raamwerk) en zijn er zand- én harskorrels als fillers (de stof die omringd wordt door de matrix) aanwezig, terwijl bij de polymeergebonden mortels het hars de matrix is en de zandkorrels de fillers (Sandler *et al.*, 1999).

Naast deze relatief duidelijk afgeijnde categorieën, zijn er de **experimentele materialen**. Deze materialen zijn nog niet commercieel beschikbaar, maar kunnen vaak tot de hogergenoemde categorieën ingedeeld worden. In deze thesis zullen enkel ijzerslakken en experimenteel zand van Sibelco® aan bod komen. Ijzerslakken zijn de restanten van ijzererts die van het ijzer gescheiden worden in hoogovens. De samenstelling van ijzerslakken kan variëren, een kort overzicht is te vinden in Tabel 2 (Lewis, 1982). Zoals uit de tabel blijkt, bevatten ijzerslakken erg veel calcium. Dit zorgt voor een zeer hoge pH van 12.7 (De Cauwer *et al.*, 2014). Het Belgisch Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw geeft aan dat slakkenzand op structureel vlak niet optimaal presteert omdat het materiaal opzwellt en zo uit de voeg omhoog rijst (OCW, 2014b).

Tabel 2: Samenstelling van ijzerslakken (Lewis, 1982)

Stof	Gewichtspercentage (%)
CaO	32 - 45
MgO	5 - 15
SiO ₂	32 - 42
Al ₂ O ₃	7 - 16
S	1 - 2
Fe ₂ O ₃	0.1 - 1.5
MnO	0.2 - 1.0

2.2.1 Indelingswijze van voegvullingen

Tabel 3: verschillende voegvullingsmaterialen met hun eigenschappen, prijzen (anno 2015 opgezocht) kunnen sterk variëren naargelang de hoeveelheid waarin ze aangekocht worden en de locatie waar ze gekocht worden en dienen bijgevolg enkel een richtlijn te geven van prijsklassen.

* Voor de definiëring van de verkeersklassen: zie Bijlage 2.

** Bij voegbreedte 3 mm en steengrootte 220 mm x 110 mm x 80 mm, voor sommige materialen is deze voegbreedte niet geschikt maar op basis van het soortelijk gewicht werd toch een theoretisch verbruik opgesteld.

Type voegvulling	Product	Producent/ verdeler	Korrelmaat	Toepassing	Waterdoorlatendheid (m s ⁻¹)	Verkeers-klasse*	Vorsttolerantie	Prijs (€ 25 kg ⁻¹)	Behoefte (kg m ⁻²)**
Klassiek ongebonden	Wit zand	Sibelco®	0/1 mm	1 tot 10 mm	3.33 x 10 ⁻⁴		Ja	0.34	5.2
	Rivierzand	Coeck®	0/2 mm	Fijne voegen	4.02 x 10 ⁻³		Ja	1.3	4.8
	Zwart zand	Michel Oprey & Beisterveld®	0.1/0.8 mm	1 tot 4 mm	Ja		Ja	8.69	5.2
	Zeezand	Holcim®	0/2 mm	Fijne voegen	3.37 x 10 ⁻⁴		Ja	0.18	5.3
	Zand van Lustin	Sagrex®	0/2 mm	Fijne voegen	1.10 x 10 ⁻²		Ja	0.32	5.2
	Kalksteen 0/2	Holcim®	0/2 mm	Fijne voegen	4.88 x 10 ⁻⁵		Ja	0.16	5.3
	Kalksteen 0/6.3	Holcim®	0/6.3 mm	Brede voegen	3.04 x 10 ⁻³		Ja	0.28	5.3
	Porfier 2/6.3	Holcim®	2/6.3 mm	Brede voegen	1.60 x 10 ⁻³		Ja	0.46	5.3
	Kalksteen 2/6.3	Sagrex®	2/6.3 mm	Brede voegen	1.98 x 10 ⁻³		Ja	0.41	5.2
	Flowpoint®	Instarmac®	/	5 tot 50 mm	0	IV	Nee	23.4	5.9
Klassiek gebonden Zoutaangerijkt zand	Dansand®	Weber-Beamix®	0/1 mm	Fijne voegen	3.33 x 10 ⁻⁴	IV	Ja	7.78	5.2
	No Weed - Block paving sand®	Dansand®	0/1.5 mm	1 tot 5 mm	3.33 x 10 ⁻⁴	IV	Ja	13.79	5.2
	Biozand®	Gebrüder Dornier GmbH®/Coeck®	0/1.8 mm	Fijne voegen	7.55 x 10 ⁻⁴		Ja	8.9	5.2
Harsgebonden mortel	Jointex® Easy Joint	McMonagle Stone®/JGS Europe®	/	Vanaf 3 mm	9.35 x 10 ⁻⁴	IV	Ja	53.3	4.4
	M-Pflasterfugenmörtel®	Tubag®	0/0.8 mm	Vanaf 5 mm	Ja	III en IV	ja		4.6
	Rompox® Easy	Romex PFM®	Pasta	Vanaf 5 mm	3.91 x 10 ⁻³	IV	Ja	53.75	4.8
	Streetprotexion® I	Pressplate Infra®	Kwartzand + 1vloeistof	Vanaf 3 mm	0	IV	Ja		4.6
	Streetprotexion® III	Pressplate Infra®	Kwartzand 0.3/0.9 mm + 2 vloeistoffen	Vanaf 5 mm	Ja	I, II, III en IV	Ja	45	5.5
Polymeer gemodificeerde mortel	Bestratingsvoegmortel M®	Remmers®	0/2 mm	4 tot 30 mm	0	I, II, III en IV	Ja	51	5.2
Joint sealers	Primeur® voegmortel	Primeur®	/	8 tot 30 mm	0	III en IV	Ja	45.25	5.2
	Seal-All® Joint	P.T.B.-Compaktuna®	Dispersie	1 tot 2 mm	0	IV		67.65	0.5 - 1 L m ⁻²
Polymeerzand	I-Fix® Paving Sealer	Instarmac®	Dispersie		0			69.02/fles (5L)	0.6 L m ⁻²
	Techniseal® DR+	P.T.B.-Compaktuna®	0/4 mm	2 tot 20 mm	Ja	IV	Ja	53.14	5.5
	Dansand® hard	Weber-Beamix®	0/4 mm	Alle voegen	1.67 x 10 ⁻⁴	I, II, III en IV	Ja	39.94	5.5
	Sika® Block Paving Fix	Sika®	/	3 tot 4 mm	0	IV	Ja	33.17	5.2
	Eco Fugensand®	Stones Gesellschaft®	/	1 tot 20 mm	Ja	IV	Zelfherstellend	53.25	4.9
		/Bouw-iii®							
	Promaq Garden Easy® fijn zand	Promaq®	/	1 tot 10 mm	0	IV	ja	51.88	7.2

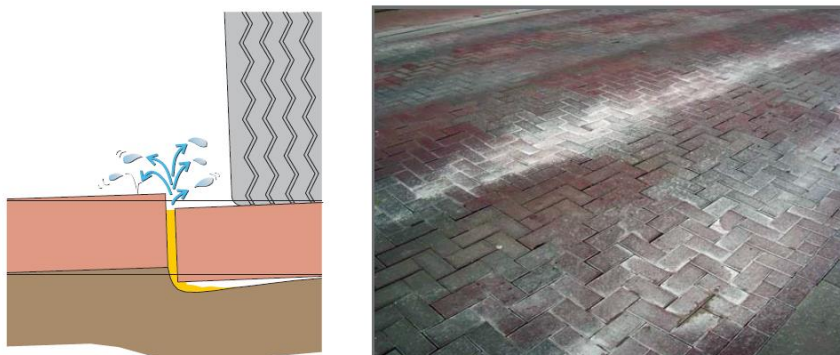
2.2.2. Functie van een voegvulling

Uiteindelijk zal een voegvulling gekozen worden op basis van meer eigenschappen dan enkel zijn onkruidwerend vermogen. De belangrijkste functies – naast onkruidwerendheid – zijn drainage en bovenal het bekomen van een stevig wegdek. In dit onderdeel worden deze functies dieper behandeld.

2.2.2.1. Drainage

Drainage is een primaire bezorgdheid bij de aanleg van een verharding; indien infiltratiewater niet tijdig kan worden afgevoerd, zal uiteindelijk de straatlaag verzadigd geraken. Bij continue belasting van de verharding zal, als de straatlaag waterverzadigd is, het zogenaamde pompeffect optreden. Hierbij worden fijne bestanddelen uit de voegen of de straatlaag via de voegen naar buiten gedreven en is er een verlies aan draagvermogen. Uiteindelijk zullen onvermijdelijk verzakkingen ontstaan die voor ongemak zorgen en op hun beurt een broeihaard zijn voor onkruiden (zie Figuur 5). Ook bij waterondoorlatende gebonden voegvullingsmaterialen zal water via scheurtjes doorsijpelen, waarop het zich zal opstapelen in de voegen en onder de straatstenen. Uiteindelijk zal het voegmateriaal door het pompeffect afbrokkelen en verdwijnen (Keymeulen *et al.*, 2009).

Om dit aanhoudend probleem te verhelpen, is in Vlaanderen sinds 2005 bij de aanleg van nieuwe verharde oppervlakken de Gewestelijke Stedenbouwkundige Vergunning Hemelwater (terug te vinden op <http://www.ruimtelijkeordening.be/NL/Beleid/Wetgeving/Uitvoeringsbesluiten/Verordeningen/VerordeningenHemelwater>) van kracht. Verhardingen van > 200 m² moeten sindsdien trachten het hemelwater optimaal op te slaan (zoals in hemelwaterputten), overtollig water moet men trachten te laten infiltreren. Er wordt voor de infiltratie een minimale buffercapaciteit vereist van 400 L/20 m². Als dit niet mogelijk is, mag het hemelwater – gescheiden van afvalwater – worden afgevoerd. Pas indien al deze ingrepen niet mogelijk zijn, mag het hemelwater in de riolering gevoerd worden. Door het water op te slaan, te bufferen en in de grond te laten infiltreren, wordt het rioleringsnetwerk immers ontlast bij zware regenval en kunnen overstromingen vermeden worden (Boogaard *et al.*, 2013). De laatste jaren wordt de afvoer van hemelwater via infiltratie bijgevolg sterk gepromoot. Zo blijft de grondwaterspiegel bovendien op een aanvaardbare hoogte (Brattebo & Booth, 2003; Scholz & Grabowiecki, 2007). Het hoogteverschil tussen het laagste punt van de verharding en de maximale hoogte van de watertafel is optimaal kleiner dan 1 m.



Figuur 5: Het pompeffect in de straatlaag (Boonen *et al.*, 2013)

2.2.2 Functie van een voegvulling

Als geopteerd wordt om infiltratiewater af te voeren, moet de voegvulling zo waterdoorlatend mogelijk zijn. De klassieke ongebonden voegvullingen kunnen hiervoor gebruikt worden, maar ook de innovatieve materialen boeken grote vooruitgangen op vlak van permeabiliteit en presteren op dit vlak vaak reeds beter dan de klassieke ongebonden materialen. Naast de voegvulling, kunnen ook de straatstenen waterdoorlatend zijn. Bij dit type verhardingen is ook de keuze van de straatlaag, de fundering en de onderfundering belangrijk om ervoor te zorgen dat het water snel genoeg in de ondergrond kan doorsijpelen (Beeldens *et al.*, 2008). Bovendien moeten straatlaag, fundering en onderfundering afgestemd zijn op de belasting (zie 2.2.2.2), anders ontstaan verzakkingen die de drainerende werking van de lagen vernielen (VELT, 2003). Waterdoorlatende verhardingen hebben liefst geen sterke helling; een maximum van 5 % wordt toegelaten, bij grotere hellingen werkt men met terrassen (Boonen, 2013).

In waterdoorlatende verhardingen worden normale betonstraatstenen met brede voegen, straatstenen met drainageopeningen of poreuze straatstenen gebruikt. Bij brede voegen of drainageopeningen wordt gestreefd naar een voegpercentage van 10 %. Om een goed infiltratievermogen van het volledig oppervlak te verkrijgen, is een permeabiliteit van $5.4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ vereist. Dit betekent dat het voegvullingsmateriaal een minimale permeabiliteit van $5.4 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ moet hebben (Boonen *et al.*, 2013).

Waterdoorlatende verhardingen zijn enkel geschikt voor plaatsen die een kleiner draagvermogen vereisen en beperkt verkeer hebben (Boogaard *et al.*, 2013) zoals parkings, voetpaden en zone 30 gebieden (Beeldens *et al.*, 2008). Om deze beperking enigszins te verhelpen, kunnen in een minder doorlatende fundering (die dus een hoger draagvermogen heeft) gaten geboord worden die vervolgens met fijne steenslag gevuld worden. Onder de fundering kan een draineerbuis geplaatst worden die op de riolering aangesloten is, zodat een deel van het percolerende water toch via de riolen kan afgevoerd worden.

Het infiltrerende water bezit vaak verhoogde concentraties opgeloste sedimenten en andere polluties, die door de straat- en funderingslagen worden weggefilterd. Het nadeel hiervan is dat de verharding geleidelijk aan zijn waterdoorlatende functie verliest door verstopping (Pratt *et al.*, 1989; Dierkes *et al.*, 2002; Lucke & Beecham, 2011). Pratt *et al.* (1989) berekenden dat een heraanleg nodig is om de 15 tot 20 jaar om een voldoende waterdoorlatendheid te behouden.

Indien gekozen wordt om hemelwater als oppervlaktewater af te voeren, moet de verharding volledig waterondoordringbaar zijn. Hierbij treden de klassieke gebonden voegvullingen op de voorgrond. Naast een geschikte, ondoorlatende voegvulling en dito tegels, is een goede infrastructuur voor de snelle afvoer van het water vereist (voldoende straatkolken en straatgoten, goed gedimensioneerde en onderhouden riolering). De hellingsgraad van de verharding dient minstens 2 % te zijn (Keymeulen *et al.*, 2009) (OCW, 2014a).

2.2.2.2. Stevigheid van het wegdek

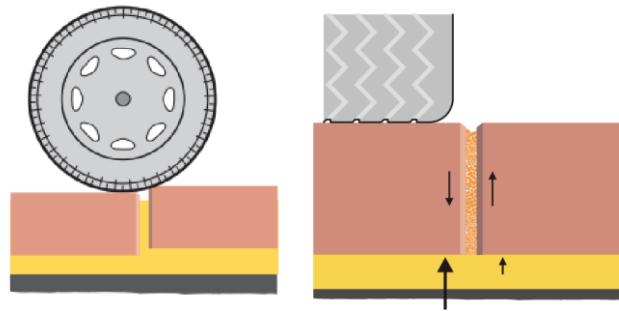
Als een steen belast wordt, wordt hij naar beneden gedrukt. Hierbij ondervindt de steen weerstand van zijn aangrenzende materialen, die de steen verhinderen te veranderen van positie. Deze aangrenzende materialen zijn de straatlaag en de voegvulling (zie Figuur 1). Door de wrijving die ontstaat tussen de steen en de voegvulling, wordt een deel van de belasting overgedragen op de aanpalende stenen. Het is gewenst dat de voegvulling voor voldoende wrijving kan zorgen, zodat de

2.2.2 Functie van een voegvulling

last over een groter oppervlak verdeeld wordt (Frederiksen *et al.*, 2007). Dit principe draagt de naam “lastoverdracht”, het berust op de zogenaamde “voegkrachten” en is erg belangrijk als men de verharding op een duurzame manier wil aanleggen (zie Figuur 6). Indien de voegen volledig gevuld zijn met een goed materiaal, zijn grote lastverdelingen over de verschillende straatstenen mogelijk (Keymeulen *et al.*, 2009).

Indien de voegen niet gevuld zijn, onvoldoende gevuld zijn of gevuld zijn met een materiaal dat de voegkrachten niet aankan of slecht overdraagt, kunnen de individuele stenen gemakkelijk verschuiven. Als de stenen bovendien geen goede verhouding oppervlakte/hoogte hebben, kunnen ze zelfs kantelen. Dit alles zorgt ervoor dat stenen afbrokkelen door tegen elkaar geslagen te worden, dat er oneffenheden ontstaan in het oppervlak en dat de verharding uiteindelijk moet heraangelegd worden.

Om de lastoverdracht te kunnen uitvoeren en zo voor mechanische sterkte en flexibiliteit van het oppervlak te zorgen, moeten voegvullingsmaterialen kunnen weerstaan aan de schurende krachten die de stenen erop uitvoeren. Net als bij de straatlaag, is het dan ook belangrijk om voegvullingsmaterialen te selecteren die hard genoeg zijn om vergruizing te vermijden (PF& U Mineral Development ApS, 2004). Om hieraan te voldoen, moeten de materialen voldoen aan categorie Ab volgens het technisch voorschrift PTV 411 (dit voorschrift wordt verder aangehaald in 2.2.4) (Boonen *et al.*, 2013).



Figuur 6: Principe van lastoverdracht (Keymeulen *et al.*, 2009)

2.2.3. Onkruidwerend vermogen

2.2.3.1. Definitie

Het onkruidwerend vermogen van een voegvulling wordt gedefinieerd als de mate waarin een voegvulling kieming en groei van onkruiden inhibeert relatief t.o.v. een referentiesubstraat dat optimaal is voor kieming en groei (bv. potgrond). Doorheen de tijd kan het onkruidwerend vermogen van een voegvulling gevoelig veranderen ten gevolge van organische vervuiling van de voeg en veranderende fysicochemische eigenschappen (o.a. pH, zoutgehalte, ionverhoudingen, wijzigende korrelverdeling, uitloging van groeiremmende ionen) (De Cauwer *et al.*, 2014). Dit is sterk afhankelijk van het voegvullingsmateriaal.

2.2.3.2. Invloedfactoren

Heel wat factoren beïnvloeden het onkruidwerend vermogen van een voegvullingsmateriaal. Vaak is er interactie tussen de factoren en moeten ze samen besproken worden, maar desondanks wordt in deze paragraaf getracht een overzicht te geven van de verschillende factoren en hun interacties.

De zuurtegraad (**pH**) is in sterke mate bepalend voor de plantengroei. De pH beïnvloedt de opneembaarheid van de voedingselementen aanwezig in de voegvulling, optimaal ligt de pH tussen 5.0 en 7.5 (Perry, 2003). Bij ongunstige pH's vormen elementen die normaal opneembaar zijn door de plantenwortels verbindingen die planten niet kunnen opnemen⁹. Bijgevolg zal de plant een gebrek hebben aan deze elementen (Lucas & Davis, 1961). Typisch wordt een hoge pH teweeggebracht door de vrijstelling van negatief geladen ionen zoals calciumionen (Tsutomu & Erich, 1990). De pH verschilt tussen categorieën van voegvullingen (klassieke ongebonden materialen t.o.v. bijvoorbeeld zoutaangerijkte zanden) en tussen voegvullingen onderling, gaande van 4.03 tot 12.70. Voor wit kwartszand bijvoorbeeld bedraagt de pH(KCl) 7.55, terwijl porfier 2/6.3 een pH heeft van 8.13. Zoutaangerijkte zanden zoals Dansand® (pH 9.57) hebben doorgaans een nog hogere pH-waarde ondermeer door toevoeging van natriumsilicaten. Een opvallende uitzondering is Rompox® Easy, die een zure pH heeft (4.03) (De Cauwer *et al.*, 2014).

Tabel 4: Richtlijnen voor de korrelverdelingsparameters van voegzand in het kader van onkruidpreventie. Hierbij is f_x de fractie fijn die kleiner is dan x %. MF staat voor "Medium Fine", een bepaalde klasse voor de fijnheidsmodulus f_m van zand (Boonen *et al.*, 2013)

Korrelverdelingsparameter	Minimaal	Aanbevolen	Code volgens PTV 411
Fractie fijn (< 0.063 mm)	< 10 %	< 5 %	f_{10}/f_5
Fractie grof (0.2 tot D mm)	> 60 %	> 2.1	-
Fijnheidsmodulus ¹⁰ f_m	> 1.5	> 2.1	MF

Om te kunnen groeien, heeft elke plant water nodig. Het **plantbeschikbaar vocht** in de voegvulling speelt dan ook een voorname rol in de onkruidwerendheid van elke voegvulling. Het plantbeschikbaar vocht wordt gedefinieerd als het verschil tussen de veldcapaciteit en het permanente verwelkingspunt

⁹ Fosfor zal bv. bij een pH > 7.5 minder oplosbare zouten vormen met calcium en magnesium, bij lage pH vormt het dan weer minder oplosbare zouten met aluminium en ijzer (Jensen, 2010).

¹⁰ De fijnheidsmodulus geeft in één getal een indicatie van de fijnheid van een materiaal. Hij wordt berekend door de som van de cumulatieve zeefresten van het materiaal op een vastgelegde reeks zeven (9 in totaal) in massaprocenten te delen door 100 (CRD-C 104-80, 1980).

2.2.3 Onkruidwerend vermogen

(Decagon, 2015). Voor landbouwgronden varieert het van 5 vol.-% voor zandgrond tot 14 vol.-% voor leemgrond en 12 vol.-% voor kleigrond. Het plantbeschikbaar vocht in de voeg wordt voornamelijk bepaald door de technische karakteristieken van het voegvullingsmateriaal, waarvan de korrelgrootteverdeling de belangrijkste is. Bij fijnkorrelige voegvullingsmaterialen wordt er minder onkruidgroei waargenomen als er overwegend meer grovere korrels (0.2 - 2 mm) en minder fijne bestanddelen (< 0.063 mm) aanwezig zijn (zie Tabel 4). Het komt er dus op aan de fractie fijn materiaal beperkt te houden om een betere onkruidwerendheid te bekomen (De Cauwer *et al.*, 2014; Boonen *et al.*, 2013). Fysicochemisch onderzoek van De Cauwer *et al.* in 2014 (zie Tabel 5) bevestigt dat fijnere materialen meer water kunnen vasthouden dan grove materialen (duidelijk zichtbaar bij kalksteen en porfier). Ook organisch materiaal kan veel vocht vasthouden, organisch vervuilde voegen bevatten bijgevolg meer plantbeschikbaar vocht dan zuivere voegen (De Cauwer *et al.*, 2014).

Tabel 5: Volumetrisch percentage aan plantbeschikbaar water voor verschillende voegvullingen (De Cauwer *et al.*, 2014)

Naam	Plantbeschikbaar water (vol.-%)
Wit zand	1.18
Zeezand	0.33
Zandsteen	4.71
Kalksteen 0/2	10.83
Kalksteen 0/6.3	8.10
Kalksteen 2/6.3	0.35
Porfier 0/6.3	7.46
Porfier 2/6.3	0.12
Biozand®	0.75
Dansand®	1.73
Dansand® stone dust	3.16
Slakkenzand	7.81

Hoge **zoutgehaltes**¹¹ zijn erg schadelijk voor plantengroei (De Cauwer *et al.*, 2014). Hoge zoutgehaltes – vooral natriumzouten bij voegvullingen – in het bodemvocht geven op korte termijn aanleiding tot fysiologische droogte. De werking berust erop dat planten anorganische zouten via het water uit de bodem opnemen. Met behulp van fotosynthese kunnen deze zouten omgezet worden in organische stof waaruit de plant opgebouwd is. De stoffen die ze opnemen moeten echter een geschikte verhouding hebben, zo zijn er enkele essentiële elementen zoals kalium, magnesium, stikstof en calcium. Natrium zorgt ervoor dat de osmotische druk van het bodemvocht stijgt waardoor opname door de planten bemoeilijkt wordt. Te hoge concentraties natrium verhinderen vochtopname volledig en zorgen zo voor fysiologische droogte (PF& U Mineral Development ApS, 2004). Bij afwisselende droge en natte periodes wordt deze fysiologische droogte nog versterkt omdat de natriumconcentraties in het poriënwater stijgen als de verdamping groter is dan de infiltratie van het water. Op de lange termijn treedt er iontoxiciteit op; de te hoge natriumconcentratie zorgt ervoor dat sommige enzymen niet meer goed functioneren door binding op de natriumionen (Munns *et al.*, 2006).

¹¹ Zoutgehalte wordt gemeten via de elektrische conductiviteit (EC), uitgedrukt in dS/m. Niet-zoute, zwak zoute, gematigd zoute, sterk zoute en zeer sterk zoute bodems worden onderscheiden door een EC van respectievelijk < 2 dS/m, 2 - 4 dS/m, 4 - 8 dS/m, 8 - 16 dS/m en > 16 dS/m. Er is echter een sterke variatie in zouttolerantie tussen plantensoorten onderling (Wentz, 2001).

2.2.3 Onkruidwerend vermogen

Een aanhoudend hoog zoutgehalte zorgt voor een beperking van de fotosynthese en de celgroei via verschillende mechanismen (Chaves *et al.*, 2009).

Optimale plantengroei vereist bovendien voldoende hoeveelheid plantopneembare **macro¹²- en micro¹³nutriënten** en gunstige **ionverhoudingen** (De Cauwer *et al.*, 2014). Hoge concentraties kalium hebben bijvoorbeeld een negatief effect op de opname van magnesium (Jakobsen, 1993). Sommige voegvullingsmaterialen (o.a. Dansand® en Biozand®) zijn daarom extreem mineralenarm. Nog andere voegvullingsmaterialen vertonen iononevenwichten, hebben een gebrek of overmaat aan sporenelementen of een overmaat aan bepaalde (voor planten niet-essentiële) elementen. Slakkenzand heeft bijvoorbeeld erg hoge concentraties aan Fe en andere metalen (zie Tabel 2). Ook leidt te hoge aanwezigheid van natriumionen tot natriumtoxiciteit, met als typisch symptoom bladrandnecrose (Bernstein, 1975). De pH beïnvloedt de vorm waarin elementen in de bodem aanwezig zijn, waardoor te lage of te hoge concentraties aan plantopneembare elementen kunnen ontstaan met overmaat- en gebrekziektes tot gevolg (Lucas & Davis, 1961). Bij hoge pH is er voornamelijk aan micronutriënten een gebrek, terwijl macronutriënten net beter beschikbaar zijn. Bij lage pH – zoals in Rompox® Easy – zijn de macronutriënten (in het bijzonder Ca, P en Mg) minder beschikbaar voor planten (Kluepfel *et al.*, 2012), terwijl micronutriënten makkelijker kunnen opgenomen worden. Een gebrek uit zich enerzijds in een geremde groei, maar vaak zijn er daarnaast ook deficiëntieverschijnselen zichtbaar (Skousen, 2005).

Scheuren in gebonden voegvullingen kunnen hun onkruidwerend vermogen ernstig verminderen. In dergelijke scheuren accumuleert organisch materiaal waardoor plantenwortels zich kunnen verankeren in een anders ondoordringbaar oppervlak en voedingselementen en vocht aantreffen. Hoewel het een erg plantaafhankelijke grens is, wordt algemeen een penetratieweerstand van 3 Mpa aanvaard als de kritische bovengrens om doorwortelbaar te zijn (Van de Ven *et al.*, 2014; Van De Vreken *et al.*, 2009). Barsten in gebonden materialen kunnen ontstaan door enerzijds de inwerking van vorst en dooi, en anderzijds door een te zware verkeersbelasting (De Cauwer *et al.*, 2014). Innovatieve gebonden voegvullingsmaterialen kunnen ook beschadigd geraken onder invloed van UV-straling (PF& U Mineral Development ApS, 2004) en strooizout. Bij de keuze van de voegvulling dient dus ook rekening gehouden met de bestendigheid ten aanzien van vorst en dooi, en strooizout (Boonen *et al.*, 2013).

Om een moeilijk doordringbare voeg te creëren voor plantenwortels in ongebonden voegvullingsmaterialen, spelen fabrikanten tevens vaak in op de korrelgrootteverdeling. Ze kunnen deze korrelgrootteverdeling namelijk zodanig instellen dat de voeg na invoegen en aantrillen goed verdicht is (PF& U Mineral Development ApS, 2004), waardoor een compacte voeg bekomen wordt. Hierbij is het aantrillen een cruciale stap. Naast een moeilijker doordringbaarheid, zorgt een compacte voeg ook voor minder plantbeschikbaar vocht en voor anaerobe omstandigheden door het volume macroporiën te reduceren (Van De Vreken *et al.*, 2009).

Organische stof zorgt voor de aanvoer van nutriënten en houdt vocht vast, twee factoren die elementair zijn voor plantengroei (De Cauwer *et al.*, 2014). Voegen veronkruiden immers meer naarmate ze sterker organisch vervuild zijn (De Cauwer *et al.*, 2014). Daarnaast zorgt organische vervuiling doorgaans voor een pH-wijziging wat het onkruidwerend vermogen van een voegvulling kan

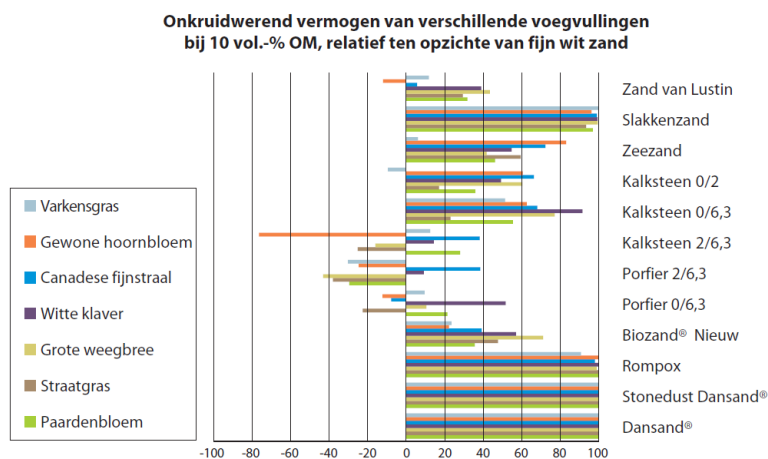
¹² Tot de macronutriënten worden N, P, K, Ca, Mg en S gerekend (George *et al.*, 2008).

¹³ Tot de micronutriënten behoren B, Cu, Fe, Cl, Mn, Mo en Zn (George *et al.*, 2008).

2.2.3 Onkruidwerend vermogen

veranderen. Zo zal het onkruidwerend vermogen van voegvullingen met intrinsiek supra-optimale pH waarden voor plantengroei aangetast worden eens de voegvulling organisch vervuild geraakt. Dit is o.a. te wijten aan verlaging van de pH als gevolg van de inbreng van organisch stof (De Cauwer *et al.*, 2013a). De invloed van pH op onkruidwerend vermogen hangt uiteraard af van andere plantengroei-beïnvloedende factoren. Materialen met hoge zoutconcentraties en intrinsiek weinig waterhoudend vermogen kunnen bij hoge vervuilingpercentages nog steeds goed presteren (De Cauwer *et al.*, 2014) (De Cauwer *et al.*, 2013a).

Het onkruidwerend vermogen van een voegvulling is **plantensoort**specifiek (zie Figuur 7) (De Cauwer *et al.*, 2013a). Er zal steeds een (groep van) species zijn die beter aangepast is aan de door de voegvulling opgelegde groeiomstandigheden (Fagot *et al.*, 2011). Zo bestaat er een groot verschil in zoutgevoeligheid tussen plantensoorten (Kortenhoff *et al.*, 2001b). Het is dus nuttig de aanwezige of verwachte onkruidflora op een bepaalde verharde plaats te bepalen en op basis daarvan een geschikte voegvulling te selecteren. Indien er geen voorkennis is van de onkruidflora, is het aangewezen een voegvullingsmateriaal te kiezen die effectief is tegen een breed spectrum aan plantensoorten (De Cauwer *et al.*, 2014).



Figuur 7: Inter- en intraspecifieke verschillen in groeirespons van onkruiden naargelang de voegvulling. Met potproeven werd het onkruidwerend vermogen bij 10 vol.-% organisch materiaal uitgedrukt als vermindering van de hoeveelheid biomassa (in %) ten opzichte van het referentiemateriaal wit zand (Boonen *et al.*, 2013)

Doorgaans hebben klassieke ongebonden voegvullingsmaterialen allen een zeker onkruidremmend vermogen. De klassieke ongebonden materialen – en dan in het bijzonder de grove materialen – vertonen echter een sterke daling in onkruidwerendheid bij bredere of vervuilde voegen (De Cauwer *et al.*, 2014). Omdat de onkruidwerendheid van de klassieke ongebonden materialen algemeen sterk daalt bij toenemende vervuilinggraden, zijn bijkomende preventieve maatregelen zoals een goed ontwerp (zie 2.1.3.1.1 Ontwerp en uitvoering) cruciaal en moeten deze voegvullingsmaterialen bij voorkeur gemeden worden in verhardingen met een hoog risico op onkruidgroei. Volgens de korrelgrootteverdeling (zie 2.2.1.1) hebben klassieke ongebonden materialen van klasse 4 over het algemeen een betere onkruidwerendheid dan de andere klassen (Boonen *et al.*, 2013).

In Tabel 3 is een kort overzicht gegeven van verschillende in België verkrijgbare voegvullingsmaterialen. In deze tabel worden zowel klassieke ongebonden als klassieke gebonden en innovatieve materialen besproken. Wat duidelijk is in deze tabel, is dat de klassieke ongebonden materialen meestal slechts een fractie kosten van de innovatieve materialen.

2.2.4. Gestelde eisen

Voegvullingen verschillen onderling sterk op vlak van structuur, samenstelling, pH etc. Al deze materialen moeten sinds 2008 wel aan zekere vereisten voldoen zoals vastgelegd in onder andere de norm NBN EN 13242 *Granulaten voor ongebonden en hydraulisch gebonden materialen voor civieltechnische werken en wegenbouw*¹⁴. Deze norm werd Europees opgesteld en is onderdeel van de Bouwproductenverordening 305/2011. Hij geldt voor alle granulaten die gebruikt worden voor bouwkundige doeleinden en is dus niet specifiek opgesteld op maat van voegvullingsmaterialen.

De Europese norm voorziet in een klassenindeling van granulaten en verwijst naar verscheidene andere Europese normen die beschrijven welke methode gebruikt moet worden om diverse eigenschappen (korrelgrootte, korrelvorm, vries- en dooiresistentie etc.) van het granulaat te testen. De norm stelt echter geen eisen omtrent minima of maxima voor deze eigenschappen, in tegenstelling tot de norm NBN EN 13888 *Mortels voor keramische tegels*. Deze laatstgenoemde norm is echter enkel van toepassing voor voegvullingen voor keramische tegels. Bijgevolg worden er anno 2015 wettelijk gezien geen eisen gesteld aan voegvullingsmaterialen voor verhardingen.

Wel zijn er in België standaardvoorschriften die gevolgd worden bij de wegenbouw. In Vlaanderen is dit het Standaardbestek 250 (te raadplegen via <http://www.wegenenverkeer.be/standaard-bestek-250/>). Hierin worden voorschriften bepaald omtrent voegbreedte en voegvullingsmateriaal naargelang de steensoort (AWV, 2014). Zo moet voor de fijne deeltjes (< 0.063 mm) de methyleenblauwwaarde¹⁵ $MB_F \leq 10$ zijn. Indien poreuze betonstraatstenen of betontegels gebruikt worden voor de bestrating, mag dan weer enkel hoekig zand gebruikt worden als voegvulling. Voor sneldrogende voegmortels zijn de vereisten duidelijk afgeleid.

PTV 411 (online beschikbaar via http://www.be-cert.be/documents/reglements-benor/granulats/ptv411_nl_cdu.pdf) is een technisch voorschrift dat de codificatie van de granulaten van minerale oorsprong beschrijft (Leefmilieu Brussel, 2010). Producten kunnen tegen dit voorschrift gecertificeerd worden om bv. het BENOR-label te halen. In dit voorschrift wordt gebruik gemaakt van dezelfde kenmerken die vernoemd worden in bovenvermelde normen, producten die voldoen aan het BENOR-label voldoen meteen ook aan de Europees opgelegde vereisten.

Volgens de Europese norm mogen producten geen gevaarlijke stoffen uitloggen boven de grenswaarden die daar nationaal voor zijn aangegeven. Naast gevaarlijke stoffen bevatten verschillende voegvullingen aanzienlijke concentraties zouten. De ionen van deze zouten zorgen voor de onkruidremmende werking van het materiaal. Hoewel fabrikanten grote inspanningen doen om de ionen zo lang mogelijk te capteren in de voegvulling (PF& U Mineral Development ApS, 2004), zal uitloging van deze ionen onvermijdelijk gebeuren. Omtrent de concentratie van ionen (dus ook voor de pH) in eluaat van voegvullingen zijn er op dit moment geen normen waaraan voldaan moet zijn, maar desondanks is het interessant een kort overzicht te geven van de concentraties in enkele voegvullingen gepaard met de richtwaarden voor grond- en drinkwater (zie Tabel 6). Als deze

¹⁴ In 2013 werd een vernieuwde versie opgesteld, maar wegens administratieve problemen werd deze teruggetrokken. Bijgevolg is de versie uit 2008 nog steeds degene die hedendaags van kracht is. De norm kan geraadpleegd worden via de website <http://www.nbn.be/nl/over-nbn/nbn>.

¹⁵ De methyleenblauwwaarde meet onrechtstreeks het gehalte klei (of algemeen fijn materiaal), het geeft aan hoeveel methyleenblauw nodig is om een suspensie van het materiaal in water te verzadigen (OCW, 2010).

2.2.4 Gestelde eisen

richtwaarden worden overschreden, kan het materiaal dat hiervan de oorzaak is, verwijderd worden (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2010). De uitloging van zware metalen uit voegvullingen (dit is vooral van toepassing op slakkenzand) wordt wel gecontroleerd (VLAREA, 2005).

Tabel 6: Kenmerkende waarden voor de uitloging van zouten uit enkele voegvullingsmaterialen volgens CMA/2/II/A.9.5 van het Compendium voor Monsterneming en Analyse in het kader van bodembescherming van de Vlaamse Overheid (Boonen et al., 2013)

**: Bron: (Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 2010)*

*** : Bron: (VMM, 2014a)*

Materiaal	EC eluaat ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH eluaat	Ca ($\mu\text{g}/\text{L}$)	K ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Mg ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Na ($\mu\text{g}/\text{L}$)	Si ($\mu\text{g}/\text{L}$)
Wit kwartszand	12 ± 2	7.8 ± 1.0	$1\,250 \pm 212$	230 ± 28	< 100	360 ± 57	$2\,150 \pm 70$
Kalksteen 0/2	205 ± 7	7.8 ± 0.2	$26\,000 \pm 2\,800$	$2\,250 \pm 350$	$3\,900 \pm 140$	2 900	920 ± 540
Zand van Lustin	160	7.8	20 000	4 600	3 400	140	770
Dansand®	2 700	11.4	440	390	< 100	480 000	130 000
Dansand® stone dust	1 400	10.4	1 700	2 600	< 100	280 000	58 000
Biozand®	120	8.1	390	160	< 100	26 000	15 000
Slakkenzand 0/2	7 100	12.5	620 000	5 600	< 10	18 000	< 100
Concentratie grondwater*	1 600	5 – 8.5	270 000	12 000	50 000	150 000	
Concentratie drinkwater**	2 100	6.5 – 9.2	270 000	-	50 000	200 000	-

Momenteel loopt het prenormatieve onderzoeksproject “Prestatie-eisen voor innovatieve voegvullingsmaterialen in bestratingen met kleinschalige elementen” (acroniem: PREVOSTRAT) met als onderzoekspartners UGent-FBW (Vakgroep Plantaardige Productie) en het OCW (Onderzoekscentrum voor de Wegenbouw) (OCW, 2014b). Het doel van dit project is om beproevingsmethoden en bijbehorende prestatie-eisen op te stellen voor voegvullingsmaterialen in verhardingen.

Een belangrijk doel van PREVOSTRAT is het ontwikkelen van een gestandaardiseerde testprocedure om het onkruidwerend vermogen van de voegvullingsmaterialen te kunnen beoordelen. Momenteel bestaat er namelijk nog steeds geen dergelijke methode en is het voor consumenten bijgevolg onmogelijk om producten te vergelijken (OCW, 2014b).

2.2.5. Ongewenste nevenwerkingen

Naast mogelijke voordelen op vlak van onkruidwerendheid, permeabiliteit en stevigheid, hebben verschillende (categorieën van) innovatieve voegvullingsmaterialen ook enkele nevenwerkingen. Deze nevenwerkingen kunnen gaan van esthetische schade tot geurhinder of zelfs gezondheidsrisico's.

Zoutaangerijkte zanden vertonen vaak een witte uitslag op de verharding die veroorzaakt wordt door accumulerend zout bovenop de voeg. Dit fenomeen van zoutaccumulatie is ook wel gekend als “zoutuitbloei”; het zout accumuleert bovenop de voeg door mee opwaarts te migreren met opstijgend water dat verdampt (Bedrijfschap Afbouw, 2009). Dit is enerzijds gewenst omdat toegevoegde zouten zo minder snel uitspoelen, maar anderzijds kan de witte “uitslag” waarin de zouten zichtbaar zijn esthetisch ongewenst zijn en door het hoog zoutgehalte aan het oppervlak kunnen schoeisel en andere materialen door corrosie beschadigd worden. Ook een erg hoge/lage pH kan voor corrosieve schade zorgen aan materialen die vaak of langdurig met het voegvullingsmateriaal in contact komen.

Niet enkel zoutaangerijkte materialen kunnen uitbloei vertonen; ook producten die met cement gebonden zijn (zoals klassieke gebonden materialen) kunnen een witte uitslag vertonen, “kalkuitbloei” in dit geval. Bij deze producten kan bij de aanleg CaCO_3 met het verdampend water opstijgen en zo afgezet worden bovenop de voeg, deze uitbloei kan gemakkelijk verwijderd worden. Indien de uitbloei pas later zichtbaar wordt, kan de afgezette witte stof (die nu zowel kalk als gips kan bevatten) moeilijker verwijderbaar zijn. Preventieve maatregelen voor dergelijke uitbloei kunnen gevonden worden in de brochure “Oorzaken en preventie van witte uitslag” van de vereniging Koninklijke Nederlandse Bouwkeramiek (KNB, 2004). Wanneer de sulfaten in cement reageren met tricalciumalumiinaat en opgeloste kalk in uithardend cement, ontstaat overigens ook ettringiet (ook: Candlot-zout). Dit ettringiet is noodzakelijk voor een goede binding maar omdat het sterk uitzet, kan het voor beschadiging van betonnen stenen of voor scheurvorming zorgen. Bij vriezen en dooien zijn deze kristallen bovendien de zwakke plekken van de voeg (Klein *et al.*, 1961; Bedrijfschap Afbouw, 2009).

Epoxyharsen kunnen verschillende allergieën veroorzaken bij personen die er vaak mee in contact komen. Tot deze allergieën behoren eczeem en zwellingen. Ook kunnen de stoffen brandwonden veroorzaken en zijn de dampen die tijdens de toepassing vrijkomen schadelijk voor ogen en luchtwegen (Geldof & Van Joost, 1989).

Joint sealers en epoxyharsen kunnen na aanleg een film vormen op de stenen. Deze filmvorming zorgt voor een blinkend uitzicht van de stenen, wat ongewenst kan zijn. Bovendien kan de film ervoor zorgen dat het oppervlak gladder wordt, waardoor de veiligheid in het gedrang kan komen. Na verloop van tijd verdwijnt de film door betreding en weersomstandigheden. Bij poreuze straatstenen kan de film echter de poriën van de stenen blokkeren, waardoor de waterdoorlatendheid afneemt (Boonen, correspondentie via mail).

Producten die polymeren van organische oorsprong bevatten, hebben vaak last van een geurprobleem; in vochtige toestand blijken deze voegvullingsmaterialen immers een “muskusgeur” te verspreiden (Leopoldseeder, 2011). Zodra het materiaal terug opgedroogd is, verdwijnt de geur ook.

Naast deze nadelen, hebben veel innovatieve materialen een zeker risico bij lichamelijk contact. Polymeerzanden kunnen bijvoorbeeld het ademhalingsstelsel irriteren bij slechte ventilatie. Ook zijn

2.2.5 Ongewenste nevenwerkingen

er producten uit alle innovatieve categorieën die vermelden dat huid- en/of oogcontact vermeden moet worden; er kan irritatie en zelfs oogschade optreden. Het is bijgevolg volgens menig producent aangeraden de nodige beschermende kledij te dragen bij het invoegen met hun product.

3. Materiaal en methoden

3.1. Voegvullingsmaterialen

In de potproeven werden in totaal 23 verschillende voegvullingsmaterialen gebruikt (zie Tabel 7). De materialen zijn representatief voor verschillende categorieën van voegvullingen (zie 2.2.1). In Tabel 7 wordt ook de pH vermeld die (indien mogelijk) werd gemeten op materiaal dat uit dezelfde verpakking afkomstig is als het gebruikte materiaal in de experimenten. Voor deze metingen werd telkens 5 g luchtdroog substraat opgelost in 25 mL 1 N KCl, 4 uur later werden de oplossingen gedurende 10 seconden geroerd, waarna de metingen plaatsvonden.

Bij de potten gevuld met fijnkorrelige voegvullingsmaterialen (zuivere of uniform organisch vervuilde) die niet uitharden, werden de ingezaaide onkruidzaden bedekt met een deklaag (dikte 1 - 2 mm) bestaande uit het voegvullingsmateriaal waarmee de potten gevuld zijn.

3.1 Voegvullingsmaterialen

Tabel 7: Geteste voegvullingsmaterialen met opgave van categorie, producent en/of verdeler, pH, experiment waarin ze getest werden en of er al dan niet een deklaag boven de zaden werd aangebracht in deze experimenten

Voegvulling	Producent/Verdeler	pH	Na-conc. ¹⁶ (mg/100 g)	Experiment	Deklaag
Klassieke ongebonden materialen					
Wit kwartzand	P.T.B.-Compaktuna®	8.4 ± 0.1	2.2	1, 2 en 3	Ja
Zwart kwartzand	P.T.B.-Compaktuna®	9.4 ± 0		3	Ja
Zeezand	Holcim®	8.6 ± 0	60.6	1, 2 en 3	Ja
Zand van Lustin (zandsteen)	Holcim®	8.0 ± 0	< 1	3	Ja
Kalksteen 0/2	Holcim®	8.4 ± 0	50.0	1, 2 en 3	Ja
Kalksteen 0/6.3	Holcim®	8.0 ± 0	47.6	3	Neen
Kalksteen 2/6.3	Holcim®	8.3 ± 0.1	49.4	1, 2 en 3	Neen
Porfier 2/6.3	Holcim®	8.6 ± 0	9.2	1, 2 en 3	Neen
Klassieke mortels					
Flowpoint®	Instarmac®	/		3	Neen
Zoutaangerijkte zanden					
Dansand®	Weber-Beamix®	9.7 ± 0		1, 2 en 3	Ja
No Weed – Block paving sand®	Dansand®	10.4 ± 0	402	3	Ja
Biozand®	Gebrüder Dorfner GmbH®/Coeck®	9.6 ± 0.1	53.2	3	Ja
Harsgebonden mortels					
Jointex® Easy Joint (kleur: basalt)	McMonagle Stone®/JGS Europe®	/		3	Neen
M-Pflasterfugenmörtel®	Tubag®	/		3	Neen
Streetprotexion® III	Pressplate Infra®	/		3	Neen
StreetProtexion® I ¹⁷	Pressplate Infra®	/		3	Neen
Joint sealers					
Seal-all® joint ¹⁸	P.T.B.-Compaktuna®	/		3	Neen
Polymeerzanden					
Techniseal® DR+	Techniseal®	11.5 ± 0		3	Neen
Dansand Hard®	Weber-Beamix®	12.1 ± 0		3	Neen
Eco Fugensand® (kleur: beige)	Stones Gesellschaft®/Bouw-iii®	10.1 ± 0		1, 2 en 3	Ja
Eco Fugensand® (kleur: basalt)	Stones Gesellschaft®/Bouw-iii®	9.9 ± 0		3	Ja
Experimentele materialen					
Ijzerslakken	Recmix®	12.8 ± 0		3	Ja
25 % experimenteel zand + 75 % wit kwartzand	Sibelco®/Coeck®	8.9 ± 0		3	Ja
		7.9 ± 0			

¹⁶ Bron: De Cauwer *et al.* (2014)

¹⁷ 3.6 L harsproduct werd gebruikt om 18 L van het bijgeleverde zand te overgieten

¹⁸ 4 L dispersie aangebracht op 18 L wit kwartzand van P.T.B.-Compaktuna®

3.2. Gebruikte testsoorten

In de opgestelde potproeven werden 5 plantensoorten gebruikt, die terug te vinden zijn in Tabel 8. Deze plantensoorten behoren tot de karakteristieke flora van verharde oppervlakken in Vlaanderen (Fagot *et al.*, 2011). Voor Engels raaigras werden zaden aangekocht van het commercieel beschikbaar ras 'Meloni' aan het ILVO (Instituut voor Landbouw- en Visserijonderzoek), de zaden van de andere onkruiden werden verzameld op een braakliggend terrein in Melle.

Tabel 8: Gebruikte testsoorten in de experimenten met enkele belangrijke eigenschappen. + +: erg tolerant/laat veel betreding toe, +: matig tolerant/laat matige betreding toe, -: weinig tolerant/laat beperkte betreding toe, - -: gevoelig/laat geen betreding toe.

Testsoort	Nederlandse benaming	Familie	Levenscyclus	Monofyletische eenheid	Zout-tolerantie	Droogte-tolerantie	Betredings-weerstand	Experiment
<i>Lolium perenne</i> L.	Engels raaigras	Poaceae	Overblijvend	Monocotyl	++	-	+	1, 2 en 3
<i>Poa annua</i> L.	Straatgras	Poaceae	Éénjarig	Monocotyl	+	-	++	2
<i>Cerastium fontanum</i> subsp. <i>vulgare</i>	Gewone hoornbloem	Caryophyllaceae	Overblijvend	Dicotyl	-	+	-	2
<i>Plantago major</i> L.	Grote weegbree	Plantaginaceae	Overblijvend	Dicotyl	+	+	++	2
<i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.	Paardenbloem	Asteraceae	Overblijvend	Dicotyl	--	++	++	1, 2 en 3

3.3. Experimenten

3.3.1. Experiment 1: Neerslagafhankelijkheid van onkruidwerend vermogen van voegvullingen

3.3.1.1. Doelstellingen

Omgevingsfactoren beïnvloeden in belangrijke mate het onkruidwerend vermogen van een voegvulling (zie 2.1.3.1). In deze potproef wordt nagegaan in welke mate het neerslagregime het onkruidwerend vermogen van voegvullingen beïnvloedt. Hierbij werd volgende hypothese [H] getest:

H1: "Het onkruidwerend vermogen van een voegvullingsmateriaal is afhankelijk van het neerslagregime."

Om deze hypothese te testen, werden twee onderzoeksvragen [O] geformuleerd:

- Is het onkruidwerend vermogen¹⁹ van een voegvulling afhankelijk van de aanwezige plantensoort? [O1]
- Is het onkruidwerend vermogen van een voegvulling afhankelijk van het neerslagregime? [O2]

3.3.1.2. Proefopzet

Het groeikamerexperiment werd in de zomer van 2014 geïnstalleerd in een groeikamer met programmeerbaar licht-, temperatuur- en neerslagregime. Deze proef werd aangelegd als een compleet gerandomiseerde blokkenproef met vier onderzoeksfactoren (plantensoort, neerslagregime, voegvullingsmateriaal en vervuilingsgraad) in 4 blokken.

Tijdens de experimenten werd in de groeikamer een 16u dag – 8u nacht fotoperiode aangehouden met behulp van Gro-lux cool white fluorescent lampen (F58W/GRO-T8, Sylvania, Erlangen, Duitsland) met een rood:verrood (R:FR) ratio van 98 en een lichtintensiteit van $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aan de bodemoppervlakte. De temperatuur werd overdag gedurende 8u op 25 °C gehouden en 's nachts op 15 °C, overgangen tussen dag- en nachttemperatuur verliepen aan een snelheid van 2.5 °C u^{-1} . De geteste neerslagregimes omvatten een neerslagrijk regime, een neerslagarm regime met korte neerslagloze periodes en een neerslagarm regime met lange, neerslagloze periodes (zie Tabel 9). Vermits de groeikamer slechts toeliet om één neerslagregime per keer te testen, werd het experiment opgesplitst in drie subexperimenten (één per neerslagregime) met name Exp. 1.1 (neerslagrijk regime), Exp. 1.2 (neerslagarm regime met korte neerslagloze periodes) en Exp. 1.3 (neerslagarm regime met lange neerslagloze periodes). De neerslagregimes verschillen in totale neerslag en/of aantal neerslagdagen en/of duur neerslagloze periodes. Ieder subexperiment werd gedurende 31 dagen aangehouden, om geoogst te worden op dag 32. De beregening werd uitgevoerd met DAN microsprinklers met fijne druppelgrootte om het substraat niet te verstoren. De proeven vonden respectievelijk plaats van 04/07/2015 t.e.m. 04/08/2015, 08/08/2015 t.e.m. 08/09/2015 en 09/09/2015 t.e.m. 10/10/2015.

¹⁹ Gemeten als kieming en biomassa

3.3.1 Experiment 1: Neerslagafhankelijkheid van onkruidwerend vermogen van voegvullingen

Tabel 9: Geteste neerslagregimes met opgave van dagelijkse watergift ($L\ m^{-2}\ dag^{-1}$), totale watergift ($L\ m^{-2}\ maand^{-1}$), en aantal neerslagdagen per maand (Experiment 1). De aangehouden neerslagregimes in subexperiment 1.1, 1.2 en 1.3 komen overeen met respectievelijk een neerslagrijke maand, een neerslagarme maand met korte neerslagloze periodes en een neerslagarme maand met lange neerslagloze periodes relatief t.o.v. een Belgisch klimaat (type Cfb) met gemiddelde 15 neerslagdagen per maand en neerslag per maand van $70\ L\ m^{-2}$ (KMI, 2015).

Dag ²⁰	Dagelijkse watergift ($L\ m^{-2}$)		
	Exp. 1.1	Exp. 1.2	Exp. 1.3
1	2.07	2.07	1.38
2	2.07	2.07	1.38
3	2.07	2.07	1.38
4	2.07	2.07	1.38
5	2.07	2.07	1.38
6	2.07	2.07	1.38
7	2.07	1.38	0
8	2.07	0	0
9	2.07	1.38	4.84
10	2.07	0	0
11	2.07	1.38	0
12	2.07	0	0
13	2.07	0	0
14	2.07	1.38	0
15	2.07	0	4.84
16	2.07	0	0
17	2.07	1.38	0
18	2.07	1.38	0
19	2.07	0	0
20	2.07	0	0
21	2.07	1.38	4.84
22	2.07	0	0
23	2.07	0	0
24	2.07	1.38	0
25	2.07	1.38	0
26	2.07	0	0
27	2.07	0	4.84
28	2.07	1.38	0
29	2.07	0	0
30	2.07	0	0
31	2.07	1.38	0
Totale watergift ($L\ m^{-2}$)	64.26	27.64	27.64
Aantal neerslagdagen	31	17	10

In elk subexperiment kwam iedere factoriële combinatie (plantensoort x voegvullingsmateriaal x organische vervuiling) in 4 herhalingen voor in een volledig gerandomiseerd – maar voor elke proef identiek – blokontwerp. In al de proeven werd gewerkt met 2 plantensoorten; Engels raaigras (*Lolium perenne* L.) en paardenbloem (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.). Deze onkruiden werden gezaaid in 7 voegvullingsmaterialen met 4 verschillende gradaties van organische vervuiling. De voegvullingsmaterialen omvatten 5 klassieke ongebonden materialen en 2 innovatieve materialen, daarnaast werden in iedere blok van elke blokkenproef twee referentiepotjes (één per plantensoort) met zuivere stekgrond, toegevoegd.

²⁰ Dag 1 van experiment 1.1, 1.2 en 1.3 stemt overeen met respectievelijk 4 juli 2014, 8 augustus 2014 en 9 september 2014.

3.3.1 Experiment 1: Neerslagafhankelijkheid van onkruidwerend vermogen van voegvullingen

Nieuw aangelegde bestratingen zijn initieel nauwelijks veronkruid. Geleidelijk aan geraken de bestratingen organisch vervuild en stijgen de kansen op onkruidgroei. Om het lange termijn gedrag van voegvullingen ten aanzien van onkruidgroei te testen, werden de bovenvermelde voegvullingen daarom zowel in zuivere als organisch vervuilde vorm getest. Om de organische vervuiling te simuleren, werd luchtdroge, fijne stekgrond (DCM, korrelgrootte < 275 µm) met het luchtdroog, zuiver materiaal vermengd. Vier gradaties van organische vervuiling werden getest, met name 0, 5, 10 en 20 vol.-%. Deze vervuilingsgraden zijn representatief voor de organische vervuiling in *in situ* verhardingen. Onderzoek heeft immers aangetoond dat de gemiddelde vervuiling op oude verhardingen 20 vol.-% organische stof is (De Cauwer *et al.*, 2014). De gebruikte volumepercentages stemmen overeen met respectievelijk 0.0 g, 15.0 g, 30.0 g en 60.0 g luchtdroge fijne stekgrond per liter mengsel²¹. Om een goede vermenging van het organisch materiaal en het voegvullingsmateriaal (organisch vervuilde voegvullingen) te verzekeren en ontmenging van voegvullingsmateriaal (zuivere voegvullingen) te voorkomen, werden de materialen intensief vermengd met behulp van een splitter (zie Figuur 8B). Vervolgens werden de potjes gevuld met de vervuilde en zuivere voegvulling en stevig aangedrukt (zie Figuur 8C). De potjes werden steeds gevuld per voegvullingsmateriaal, van lage vervuilingsgraad naar hoge vervuilingsgraad en voor de 4 herhalingen tegelijk. Telkens alle potjes van een voegvullingsmateriaal gevuld waren, werd al het materiaal (scheppen, bassins, maatbeker, weegschaal, splitter) met behulp van perslucht gereinigd.

Tabel 10: Technische karakteristieken van de gebruikte voegvullingsmaterialen in Experiment 1 (De Cauwer *et al.*, 2014)

Voegvulling	Korrelgrootte (mm)	Plantbeschikbaar water (vol.-%)
Klassieke ongebonden materialen		
Wit kwartszand	0 - 2	1.18
Zeezand	0 - 2	0.33
Kalksteen 0/2	0 - 2	10.83
Kalksteen 2/6.3	2 - 6.3	0.35
Porfier 2/6.3	2 - 6.3	0.12
Zoutaangerijkt zand		
Dansand® fijn	0 - 2	1.73
Polymeerzand		
Eco Fugensand® beige	0 - 2	-
Referentie		
Stekgrond	0 - 0.275	

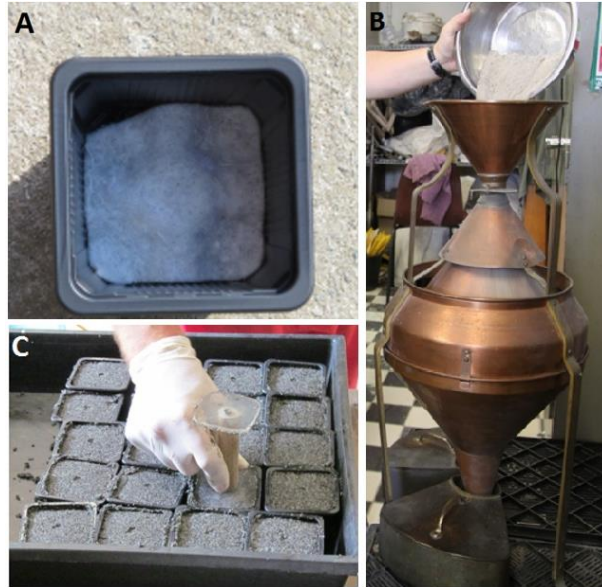
Alle proeven werden uitgevoerd in vierkante plastic potjes (Thovadec, 0.3 L inhoud, afmetingen 7 x 7 x 8 cm). De voegvullingsmaterialen werden in zo fijn mogelijke vorm (indien het materiaal samengeklit was, werd het eerst opnieuw herleid tot diens oorspronkelijke korrelvorm) aangebracht in de potjes. Om te verhinderen dat het voegvullingsmateriaal zou wegstromen langs de gaten van de potjes werd een waterdoorlatend geotextiel-doekje aangebracht op de bodem van de potjes (zie Figuur 8A). De potjes werden gevuld met voegvullingsmaterialen tot op enkele mm van de rand zodat de zaden na het zaaien nog afgedekt konden worden met een deklaag. Daarna werden de potjes achtereenvolgens

²¹ Gemakkelijkheidshalve werd ervan uitgegaan dat de dichtheid van de verschillende voegvullingsmaterialen steeds dezelfde is als die van wit kwartszand. Bovendien is de gemiddelde absolute hoeveelheid organische stof volgens deze werkwijze gemiddeld steeds gelijk, onafhankelijk van het voegvullingsmateriaal.

3.3.1 Experiment 1: Neerslagafhankelijkheid van onkruidwerend vermogen van voegvullingen

ingezaaid met exact 25 zaden per pot, al dan niet voorzien van een 1 - 2 mm dik deklaagje (zie Tabel 7) en aangedrukt.

De ingezaaide potjes werden tenslotte volgens het vooropgestelde volledig gerandomiseerde blokontwerp in bakken geplaatst.



Figuur 8A: Gebruikte potjes met geotextiel-doek onderaan om het materiaal in het potje te houden; 8B: De splitter waarmee de materialen grondig werden gemengd met het organisch materiaal; 8C: Het aandrukken van de voegvulling

3.3.1.3. Metingen

Het onkruidwerend vermogen werd bepaald aan de hand van twee responsparameters, met name percentage aan levende planten per pot en drooggewicht aan levende, bovengrondse biomassa (hierna droge biomassa genoemd) per pot. Het percentage levende planten werd wekelijks bepaald via telling van de overlevende planten.

Bij de oogst (32 dagen na installatie van de proef) werden alle levende planten tot op 4 mm boven het grondoppervlak afgeknipt. Na 16 uur drogen in een droogstoof ingesteld op 75°C werd het drooggewicht aan levende, bovengrondse biomassa bepaald.

3.3.1.4. Statistische verwerking

Statistische verwerking gebeurde met behulp van het verwerkingsprogramma R (versie 3.1.1). Hierbij gebeurde alles op het 5 % significantieniveau.

Aan de hand van de droge biomassa werd gezocht naar significante verschillen tussen neerslagregimes binnen iedere factoriële combinatie van plantensoort, voegvullingsmateriaal en vervuilingsgraad enerzijds en naar significante verschillen tussen vervuilingsgraden binnen iedere factoriële combinatie van plantensoort, voegvullingsmateriaal en neerslagregime anderzijds. Hierbij werden telkens zowel plantensoort als voegvullingsmateriaal als vaste factor beschouwd. De homoscedasticiteit werd gecontroleerd met behulp van de Levene test. Om normaliteit te controleren, werd gebruik gemaakt van een plot van de residuen en van een Lilliefors test. Indien er geen normaliteit was, werd een Box-Cox transformatie gedaan om toch zowel homoscedasticiteit als normaliteit te bekomen. Indien

3.3.1 Experiment 1: Neerslagafhankelijkheid van onkruidwerend vermogen van voegvullingen

homoscedasticiteit en normaliteit aanwezig waren (eventueel na transformatie), werd met one-way ANOVA (analysis of variances) getest op significante verschillen gevolgd door – indien er significante verschillen waren – een meervoudig vergelijken van de gemiddelden met behulp van de TukeyHSD (Tukey's Honest Significant Differences) test. Bij het ontbreken van normaliteit werd een Kruskal-Wallis test uitgevoerd, gevolgd door een meervoudig vergelijken van de gemiddelden via een pairwise t-test met Bonferroni correctie.

De opkomst werd uitgedrukt in percentages. De opkomst na 2 weken werd voor elke factoriële combinatie van plantensoort, voegvullingsmateriaal, vervuilingsgraad en neerslagregime vergeleken met de opkomst na 4 weken met behulp van een paired t-test.

3.3.2. Experiment 2: Onkruidwerend vermogen van voegvullingen onder kunstmatige en semi-natuurlijke omstandigheden

3.3.2.1. Doelstellingen

In dit experiment werd nagegaan in welke mate het onkruidwerend vermogen van voegvullingen onder kunstmatige omstandigheden (groei-kameromgeving, zie experiment 1) afwijkt van het onkruidwerend vermogen onder semi-natuurlijke omstandigheden (gaasserre-omgeving, experiment 2). Hierbij werd de volgende hypothese beproefd:

H2: "Potproeven uitgevoerd in een groei-kamer zijn bruikbaar om het onkruidwerend vermogen in situ in te schatten."

Om deze hypothese te testen, werd volgende onderzoeksvraag geformuleerd:

- Gedragen voegvullingen zich anders onder kunstmatige omstandigheden dan onder semi-natuurlijke omstandigheden? [O3]

Om deze hypothese te testen, werd gebruik gemaakt van de dataset verworven in experiment 1 en de dataset uit experiment 2 (met ondervermelde proefopzet).

3.3.2.2. Proefopzet

Het experiment vond plaats in een plastic koepel-serre om uitwendige factoren zoals schade door insecten, vogels of hevige regen uit te sluiten. De zij-kanten van de serre waren onderaan 100 cm open (enkel bekleed met windbreekgaas) om natuurlijke ventilatie toe te staan. Zo leunden temperatuur, lichtintensiteit en relatieve vochtigheid dicht aan bij die van de buitenomgeving, waardoor deze proef representatief is voor een buitenproef. Deze proef werd aangehouden van 4 juli 2014 t.e.m. 1 september 2014, oftewel 59 dagen. De proefopzet is identiek aan deze van experiment 1 maar er was slechts 1 neerslagregime. De beregeningshoeveelheid en dagtemperatuur in de koepel-serre te Melle tijdens dit experiment kunnen geraadpleegd worden in Tabel 11 (verkorte versie) of in Bijlage 3 (per dag). Gedurende het experiment is de gemiddelde neerslaghoeveelheid $2.97 \text{ L m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$.

Tabel 11: Gemiddelde dagtemperatuur en neerslaghoeveelheid in de koepel-serre gedurende de volledige duur van experiment 2

Periode	Gemiddelde dagtemperatuur (°C)	Neerslag ($\text{L m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$)
4 juli - 10 juli 2014	20.2	4.2
11 juli - 15 juli 2014	20.9	2.1
16 juli - 25 juli 2014	28.7	3.5
26 juli - 3 aug 2014	25.6	3.5
4 aug - 14 aug 2014	21.5	2.1
15 aug - 24 aug 2014	18.4	2.8
25 aug - 31 aug 2014	18.9	2.1
1 sep 2014	21.5	2.8
Totaal	22.3	175

3.3.2 Experiment 2: Onkruidwerend vermogen van voegvullingen onder kunstmatige en semi-natuurlijke omstandigheden

3.3.2.3. Metingen

Het onkruidwerend vermogen werd bepaald aan de hand van de twee responsparameters, namelijk het percentage aan levende planten per pot en het drooggewicht aan levende bovengrondse biomassa per pot. Het tellen van de planten en de oogst gebeurde op identieke wijze als bij experiment 1 (zie 3.3.1.3).

3.3.2.4. Statistische verwerking

Statistische verwerking gebeurde met behulp van het verwerkingsprogramma R (versie 3.1.1). Hierbij gebeurde alles op het 5 % significantieniveau.

Er werd gezocht naar significante verschillen tussen de gemiddelde biomassa's van de verschillende neerslagregimes (zijnde de drie neerslagregimes uit experiment 1 en het neerslagregime in experiment 2) en dit binnen iedere factoriële combinatie van plantensoort, voegvullingsmateriaal en vervuilingsgraad. Hiervoor werd bij normaliteit en homoscedasticiteit een one-way ANOVA uitgevoerd, gevolgd door een TukeyHSD test. Als ANOVA niet mogelijk bleek te zijn, werd een Kruskal-Wallis test uitgevoerd, gevolgd door een pairwise t-test met Bonferroni correctie. Significante verschillen tussen de verschillende vervuilingsgraden in experiment 2 werden steeds met one-way ANOVA opgespoord, aangezien er telkens normaliteit aanwezig was.

De opkomst werd uitgedrukt in percentages. De opkomst na 2 weken werd voor elke factoriële combinatie van plantensoort, voegvullingsmateriaal en vervuilingsgraad vergeleken met de opkomst na 4 weken met behulp van een paired t-test. De opkomst na 4 weken werd op dezelfde wijze vergeleken met de opkomst na 8 weken.

Correlaties tussen experiment 2 enerzijds en experimenten 1.1, 1.2 en 1.3 anderzijds werden bepaald met behulp van een lineaire regressie.

3.3.3. Experiment 3: Onkruidwerend vermogen van commercieel beschikbare voegvullingen

3.3.3.1. Doelstellingen

Het onkruidwerend vermogen kan tussen voegvullingsmaterialen sterk verschillen. Zelfs binnen eenzelfde voegvullingscategorie werden reeds significante verschillen ontdekt (De Cauwer *et al.*, 2014). De markt wordt overspoeld met voegvullingsmaterialen die allen in meer of mindere mate pretenderen onkruidwerend te zijn. In deze screeningproef werd het onkruidwerend vermogen (op korte en lange termijn) van een ganse reeks commercieel beschikbare voegvullingsmaterialen onderling vergeleken. Daarnaast werden ook enkele experimentele materialen getest.

Hierbij werd de volgende hypothese geformuleerd:

H3: *“Commercieel beschikbare voegvullingen tonen een grote variatie in onkruidwerend vermogen zowel binnen als tussen categorieën van voegvullingen.”*

Om deze hypothese te testen, werden volgende onderzoeksvragen gesteld:

- Varieert het onkruidwerend vermogen van een voegvulling van plantensoort tot plantensoort? [O4]
- Hoe groot zijn de verschillen in onkruidwerend vermogen binnen en tussen categorieën van voegvullingsmaterialen? [O5]
- Heeft organische vervuiling en wijze waarop ze is aangebracht een significante invloed op het onkruidwerend vermogen? [O6]

3.3.3.2. Proefopzet

Deze potproef liep van 16 juli 2014 t.e.m. 16 september 2014 (62 dagen) in de koepelserre beschreven bij experiment 2 (zie 3.3.2.2). Dit experiment werd opgezet als een compleet gerandomiseerde blokkenproef met 3 onderzoeksfactoren (plantensoort, voegvulling en vervuilingsgraad) in 4 herhalingen. 23 verschillende voegvullingsmaterialen uit verschillende categorieën die in de literatuurstudie aan bod kwamen (zie Tabel 7), werden getest. Sommige van deze voegvullingen zijn verwant (wit kwartszand versus zwart kwartszand²², Eco Fugensand® beige versus Eco Fugensand® basalt) of bevatten in grote mate dezelfde componenten maar verschillende leveranciers (Dansand® versus No Weed - Block paving sand®). Dergelijke “analogen” werden opgenomen in de proef om te achterhalen of de samenstelling wijzigt naargelang de verdeler en/of kleurvariant.

Iedere voegvulling werd getest in zuivere vorm en in organisch vervuilde vorm. Twee wijzen van organische vervuiling werden getest; enerzijds werd het materiaal uniform vervuild met 20 vol.-% stekgrond (60 g per liter mengsel) (hierna uniforme vervuiling genoemd), anderzijds werd het zuiver voegvullingsmateriaal afgedekt met een 5 mm dikke deklaag van zuivere stekgrond (hierna topaagvervuiling genoemd). Beide scenario's komen voor op *in situ* verhardingen. Bij ongebonden

²² Zwart kwartszand bevat – net als wit kwartszand – als belangrijkste bestanddeel kwarts. Het verschilt echter van wit kwartszand door de verhoogde aanwezigheid van zware, donkergekleurde mineralen zoals – naargelang de oorsprong van het zand – magnetiet, basalt, tourmalijn of hematiet. Veel van deze mineralen bevatten ijzer. Niet alle dergelijke mineralen zijn even stabiel, waardoor de kleur kan vervagen (Hursl & Niedermayr, 2003).

3.3.3 Experiment 3: Onkruidwerend vermogen van commercieel beschikbare voegvullingen

voegvullingen kan de vervuiling uniform voorkomen of eerder als oppervlakkige vervuiling, terwijl het bij gebonden uithardende voegvullingsmaterialen vooral gaat om toplaagvervuiling.

Mogelijk varieert het onkruidwerend vermogen van plantensoort tot plantensoort. Daarom werden 5 verschillende plantensoorten gezaaid die heel frequent voorkomen op verhardingen in Vlaanderen (Fagot *et al.*, 2011) (zie Tabel 8). Elke combinatie plantensoort x voegvulling werd bij 3 verschillende vervuilingsgraden getest in 4 herhalingen. Elke plantensoort werd ook viermaal ingezaaid in zuivere potgrond als referentie.

In dit experiment werd met dezelfde potjes gewerkt als in experiment 1 en experiment 2. Ook werden de potjes op identieke wijze gevuld met de voegvullingsmaterialen, gebruikmakend van een splitter waar mogelijk (niet mogelijk met klassieke mortels, harsgebonden mortels en joint sealers) en voorzien van 25 zaden van een welbepaalde plantensoort. De zaden, ingezaaid in potjes met zuivere voegvulling en uniforme vervuilde voegvulling, werden afgedekt (enkel de fijnkorrelige materialen) met een deklaagje bestaande uit hetzelfde materiaal als de rest van het potje. Bij de potjes met toplaagvervuiling fungeerde de oppervlakkig aangebrachte laag stekgrond als deklaag voor het zaad.

De neerslaghoeveelheid en de gemiddelde dagtemperatuur in de koepelserre te Melle tijdens dit experiment kan geraadpleegd worden in Tabel 12 (verkorte versie) of in Bijlage 3 (per dag).

Tabel 12: Gemiddelde dagtemperatuur en neerslaghoeveelheid in de koepelserre gedurende de volledige duur van experiment 3

Periode	Gemiddelde temperatuur (°C)	Neerslag (L m ⁻² dag ⁻¹)
16 juli - 25 juli 2014	28.7	3.5
26 juli - 3 aug 2014	25.6	3.5
4 aug - 14 aug 2014	21.5	2.1
15 aug - 24 aug 2014	18.4	2.8
25 aug - 31 aug 2014	18.9	2.1
1 sep - 8 sep 2014	21.7	2.8
9 sep - 16 sep 2014	19.5	2.8
Totaal	22.2	177.1

3.3.3.3. Metingen

Ook in dit experiment werd het onkruidwerend vermogen bepaald aan de hand van het percentage aan levende planten per pot en het drooggewicht aan levende bovengrondse biomassa per pot. In dit experiment werd het percentage levende planten tweewekelijks bepaald via telling van de levende planten per pot.

Bij het oogsten (dag 62 na installatie van de proef) werd de bovengrondse levende biomassa afgeknipt. Na 16 uur drogen op 75°C in de droogstoof werd het drooggewicht aan biomassa bepaald.

3.3.3.4. Statistische verwerking

Statistische verwerking gebeurde met behulp van het verwerkingsprogramma R (versie 3.1.1). Hierbij gebeurde alles op het 5 % significantieniveau.

Binnen elke factoriële combinatie van plantensoort en vervuilingsgraad werden significante verschillen tussen de gemiddelde droge biomassa's van de verschillende voegvullingen gezocht met behulp van

3.3.3 Experiment 3: Onkruidwerend vermogen van commercieel beschikbare voegvullingen

een Kruskal-Wallis test, gevolgd door een pairwise t-test met Bonferroni correctie. Er was immers nooit normaliteit aanwezig. Voor het vergelijken van de droge biomassa van de verschillende vervuilingsgraden binnen elke factoriële combinatie van plantensoort en voegvulling, werd gebruik gemaakt van ANOVA en TukeyHSD indien mogelijk. Bij het ontbreken van normaliteit werden een Kruskal-Wallis test met bijhorende pairwise t-test met Bonferroni correctie uitgevoerd.

De opkomst werd uitgedrukt in percentages. De opkomst na 4 weken werd voor elke factoriële combinatie vergeleken met de opkomst na 8 weken met behulp van een paired t-test.

3.3.3 Experiment 3: Onkruidwerend vermogen van commercieel beschikbare voegvullingen

4. Resultaten en discussie

4.1. Experiment 1

4.1.1. Resultaten

Figuur 9 en Figuur 10 tonen de biomassa-accumulatie 32 dagen na inzaai (net voor de oogst) voor resp. paardenbloem en Engels raaigras in diverse zuivere en organisch vervuilde voegvullingen onder drie verschillende neerslagregimes.



Figuur 9: Biomassa-accumulatie voor paardenbloem in diverse zuivere en organisch vervuilde voegvullingen blootgesteld aan drie neerslagregimes (Exp. 1.1: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand⁻¹, Exp. 1.2; neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand⁻¹; Exp. 1.3: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand⁻¹). De voegvullingsmaterialen zijn v.l.n.r. wit kwartzand, zeezand, kalksteen 0/2, Dansand®, Eco Fugensand®, porfier 2/6.3 en kalksteen 2/6.3. De vervuilingsgraad van het materiaal is van boven naar onder: 20 vol.-%; 10 vol.-%; 5 vol.-%; 0 vol.-%.



Figuur 10: Biomassa-accumulatie voor Engels raaigras in diverse zuivere en organisch vervuilde voegvullingen blootgesteld aan drie neerslagregimes (Exp. 1.1: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand⁻¹, Exp. 1.2; neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand⁻¹; Exp. 1.3: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand⁻¹). De voegvullingsmaterialen zijn v.l.n.r. wit kwartzand, zeezand, kalksteen 0/2, Dansand®, Eco Fugensand®, porfier 2/6.3 en kalksteen 2/6.3. De vervuilingsgraad van het materiaal is van boven naar onder: 20 vol.-%; 10 vol.-%; 5 vol.-%; 0 vol.-%.

Invloed van de plantensoort op het onkruidwerend vermogen

De droge biomassa paardenbloem (zie Tabel 13) is in 77.4 % van de onderzochte combinaties voegvulling x vervuilingsgraad x neerslagregime lichter dan de droge biomassa Engels raaigras. Slechts in 2 factorcombinaties (wit kwartzand met 10 vol.-% organische vervuiling bij neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2) en porfier 2/6.3 met 0 vol.-% organische vervuiling bij neerslagarm regime met weinig neerslagdagen (Exp. 1.3)) is de geoogste droge biomassa van paardenbloem groter dan die van Engels raaigras. De innovatieve materialen Dansand® en Eco Fugensand® vertonen voor beide plantensoorten amper onkruidgroei. Over alle neerslagregimes en vervuilingsgraden heen, is kalksteen 0/2 van alle geteste klassieke ongebonden materialen doorgaans het best in staat om

4.1 Experiment 1

paardenbloem te weerhouden. Op de tweede plaats komt kalksteen 2/6.3, gevolgd door zeezand. Porfier 2/6.3 en wit kwartszand tenslotte zijn het zwakst onkruidwerend.

Ten opzichte van Engels raaigras verandert deze rangschikking enigszins. Zeezand is van alle geteste klassieke ongebonden materialen over alle vervuilingsgraden en neerslagregimes heen doorgaans het best in staat Engels raaigras te onderdrukken. Het presteerde nochtans bij een neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2) het zwakst van alle geteste materialen bij 20 vol.-% organische vervuiling. Op de tweede plaats volgt kalksteen 2/6.3, dat evenwel ook tweemaal het zwakst presterende materiaal blijkt te zijn (bij het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen bij 10 en 20 vol.-% organische vervuiling). De derde plaats wordt gedeeld door kalksteen 0/2 en wit kwartszand, en het zwakst onkruidwerend is porfier 2/6.3. In vergelijking met de innovatieve materialen echter presteren zelfs de beste klassieke ongebonden materialen zwak; in beide neerslagarme regimes is zowel Dansand® als Eco Fugensand® volledig onkruidvrij.

Figuur 11 geeft de groeirespons van paardenbloem en Engels raaigras voor de geteste voegvullingen bij 0 vol.-% en 20 vol.-% organische vervuiling, relatief ten opzichte van wit kwartszand. In zuivere vorm is wit kwartszand het minst onkruidwerend ten opzichte van paardenbloem ongeacht het neerslagregime, maar bij 20 vol.-% vervuiling presteren zeezand (neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2)) en porfier 2/6.3 (beide neerslagarme regimes (Exp. 1.2 en 1.3)) zwakker. Kalksteen 0/2 heeft – ongeacht de vervuilingsgraad – minstens 20 % minder biomassa-accumulatie van paardenbloem dan wit kwartszand. Ten opzichte van Engels raaigras zijn de resultaten wisselvalliger; elk klassieke ongebonden voegvullingsmateriaal is bij minstens één factorcombinatie vervuilingsgraad x neerslagregime het minst onkruidwerend. In zuivere toestand is kalksteen 0/2 bijvoorbeeld bij elk neerslagregime het minst onkruidwerend, terwijl het bij 20 vol.-% vervuiling nooit het zwakst presteert. De innovatieve materialen Dansand® en Eco Fugensand® zijn ten opzichte van wit kwartszand over alle vervuilingsgraden en neerslagregimes heen sterk onkruidwerend, ongeacht de plantensoort.

In Tabel 14 en Tabel 15 zijn de resultaten van de opkomststellingen na 2 en na 4 weken weergegeven. Er zijn enkele significante verschillen aanwezig tussen het aantal kiemplanten na 2 en na 4 weken voor factorcombinaties plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad x neerslagregime. Deze significante verschillen vertonen geen correlatie met een voegvulling of vervuilingsgraad, maar er is wel een discrepantie tussen paardenbloem (32 % van de significante verschillen) en Engels raaigras (68 % van de significante verschillen). Daarnaast betreft 80 % van de significante verschillen een daling in het aantal kiemplanten naarmate de tijd vordert. Slechts bij 10 factoriële combinaties (11.9 %) zijn er meer kiemplanten aanwezig van paardenbloem dan van Engels raaigras.

Invloed van het neerslagregime op het onkruidwerend vermogen

Figuur 9 en Figuur 10 illustreren het effect van een verschillend neerslagregime op biomassa-accumulatie van paardenbloem en Engels raaigras in de verschillende zuivere en organisch vervuilde voegvullingen. Figuur 12 en Figuur 13 bevestigen dat de droge biomassa steeds het hoogst is bij een neerslagrijk regime (Exp. 1.1) (21 tot 747 % meer biomassa dan het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen). Daarnaast blijkt uit deze figuren dat niet enkel het neerslagvolume, maar ook het aantal neerslagdagen de biomassa-accumulatie bepaalt, ongeacht de plantensoort. Bij een neerslagarm regime is er immers in elke geteste factorcombinatie even veel of (tot 478 %) meer biomassa bij veel neerslagdagen (Exp. 1.2) dan bij weinig neerslagdagen (Exp. 1.3). Het neerslagregime

4.1 Experiment 1

heeft geen invloed op de biomassa gevormd in innovatieve materialen Dansand® en Eco Fugensand®; er is nauwelijks biomassa-accumulatie ongeacht het neerslagregime.

Uit Tabel 13 blijkt dat de geoogste biomassa's van deze neerslagregimes vaak (53.6 % van de geteste factorcombinaties) niet significant verschillend zijn. Indien er toch significante verschillen optreden, is dit steeds tussen het neerslagrijk regime (Exp. 1.1) enerzijds en het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen (Exp. 1.3) anderzijds. Het neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2) kan significant verschillend zijn van het neerslagrijk regime, van het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen of van geen van beiden. Er is geen verband tussen het voorkomen van significante verschillen en voegvulling of vervuilingsgraad. Bij de drie geteste neerslagregimes is de rangschikking van de klassieke ongebonden materialen volgens hun onkruidwerend vermogen telkens verschillend. Doorgaans zijn wit kwartszand en porfier 2/6.3 het minst onkruidwerend; ze vertonen elk respectievelijk in 42 en 29 % van de geteste factorcombinaties het meest biomassa-accumulatie. Zeezand, kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3 zijn elk in respectievelijk 38, 33 en 25 % van de factorcombinaties het meest onkruidwerende materiaal.

Het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen (Exp. 1.3) heeft altijd het kleinste kiemingspercentage (zie Tabel 14 en Tabel 15). In 73.2 % van de factorcombinaties heeft het neerslagrijk regime (Exp. 1.1) het hoogste kiemingspercentage, in de overige 26.8 % van de factorcombinaties is het kiemingspercentage van het neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2) hoger. Er is een duidelijk verschil merkbaar tussen de neerslagregimes omtrent het aantal significante verschillen tussen het aantal kiemplanten na 2 en na 4 weken; 68 % van de significante verschillen treden op in het neerslagrijk regime, in de twee neerslagarme regimes treden veel minder significante verschillen op (elk 16 % van het totaal aantal significante verschillen).

Het neerslagregime beïnvloedt bijgevolg zowel de droge biomassa als het aantal kiemplanten, waarbij zowel de droge biomassa als het aantal kiemplanten over het algemeen daalt bij een dalend volume toegediend water of bij een dalend aantal neerslagdagen (weliswaar niet steeds op significante wijze), onafhankelijk van de plantensoort, de voegvulling of de vervuilingsgraad.

4.1 Experiment 1

Tabel 13: Gemiddelde droge biomassa (mg pot⁻¹) ± standaardfout in functie van voegvulling, volumepercent organische vervuiling en neerslagregime, 32 dagen na inzaai.

		Paardenbloem				Engels raaigras			
Voegvulling	Neerslagregime	0 vol.-%	5 vol.-%	10 vol.-%	20 vol.-%	0 vol.-%	5 vol.-%	10 vol.-%	20 vol.-%
Klassieke ongebonden materialen									
Wit kwartszand	Exp. 1.1	42 ± 5.2 *	76 ± 18 b *†	146 ± 7.8 b†	256 ± 25.8 b‡	71 ± 9.1 *	187 ± 26.7 b*†	223 ± 15.1 b*†	271 ± 84.7 b†
	Exp. 1.2	33 ± 12.1	41 ± 13.8 a	91 ± 34.1 ab	89 ± 31.5 a	65 ± 12.6	104 ± 29.5 a	80 ± 9.3 a	130 ± 28 a
	Exp. 1.3	17 ± 11.4	26 ± 8.7 a	51 ± 23.9 a	84 ± 36.6 a	49 ± 13.4	57 ± 23.5 a	65 ± 14.4 a	89 ± 31.3 a
Zeezand	Exp. 1.1	42 ± 3.2 b*	62 ± 4 *	68 ± 22.8 *†	156 ± 32.8 †	69 ± 10.4 b*	103 ± 22.1 *†	138 ± 46.4 b*†	246 ± 54 †
	Exp. 1.2	10 ± 8.6 a*	47 ± 11.9 *†	40 ± 23.8 *†	95 ± 18.2 †	41 ± 11.4 b*	64 ± 10.7 *	55 ± 21.8 a*	214 ± 29.7 †
	Exp. 1.3	5 ± 5.1 a	28 ± 8.7	9 ± 7.3	39 ± 22.1	9 ± 8.9 a	64 ± 27.1	55 ± 26.8 c	84 ± 49.7
Kalksteen 0/2	Exp. 1.1	30 ± 8.7 *	59 ± 11.4 b*†	83 ± 15.4 b†	69 ± 6.5 †	95 ± 10.3 b*	120 ± 12.6 b*	161 ± 13.1 c*	255 ± 36.4 b†
	Exp. 1.2	21 ± 12.2 *	32 ± 16.9 ab*†	38 ± 10 a*†	47 ± 18.6 †	78 ± 3.9 ab*	96 ± 15.9 ab*	89 ± 31.2 b*	195 ± 25.2 ab†
	Exp. 1.3	6 ± 5	12 ± 12 c	16 ± 9.5 c	23 ± 9.9	56 ± 9.8 c	31 ± 29.1 c	19 ± 13.7 e	100 ± 42.8 c
Kalksteen 2/6.3	Exp. 1.1	35 ± 3.1 d*	56 ± 2.8 *	75 ± 7.7 *	146 ± 22.8 f†	64 ± 2.3 h*	90 ± 5.2 *	103 ± 14.5 *	194 ± 13.2 l†
	Exp. 1.2	23 ± 7.8 ab*	35 ± 13.3 *†	49 ± 8.4 *†	70 ± 27.9 ab†	62 ± 6.2 ab*	66 ± 4.7 *	95 ± 10.5 *	174 ± 17.7 ab†
	Exp. 1.3	16 ± 5.7 c	27 ± 11.2	37 ± 16.6	20 ± 15.5 e	39 ± 8.4 a*	64 ± 16.2 *	85 ± 16.5 *†	118 ± 17.5 a†
Porfier 2/6.3	Exp. 1.1	30 ± 1.6 *	56 ± 6.7 †	105 ± 4.1 ‡	180 ± 11.7 d‡	73 ± 7.4 b*	112 ± 5.2 *	149 ± 39.6 *	260 ± 19.1 b†
	Exp. 1.2	29 ± 10.7 *	48 ± 8 *	65 ± 21.4 *	153 ± 24.6 ab†	52 ± 10.5 b*	97 ± 8.4 *†	110 ± 14 †	182 ± 27.5 ab‡
	Exp. 1.3	11 ± 6.3 *	41 ± 12.9 *†	57 ± 21.2 *†	91 ± 29.7 a†	9 ± 8.4 a*	65 ± 15.1 *†	81 ± 30 †	118 ± 20.9 a†
Zoutaangerijkte materialen									
Dansand®	Exp. 1.1	0 ± 0	0 ± 0.2	0 ± 0	2 ± 1.5	2 ± 1.3	2 ± 0.5 f	7 ± 4.6 i	6 ± 2.1 f
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 e	0 ± 0 h	0 ± 0.3 e
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 e	0 ± 0 h	0 ± 0 e
Polymeerzanden									
Eco Fugensand®	Exp. 1.1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0.2	0 ± 0	1 ± 0.7	1 ± 1	1 ± 0.5 h
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0.2	0 ± 0	0 ± 0 g
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 g

Exp. 1.1: neerslagrijk regime (64.26 L m⁻² maand⁻¹) met 31 neerslagdagen maand⁻¹

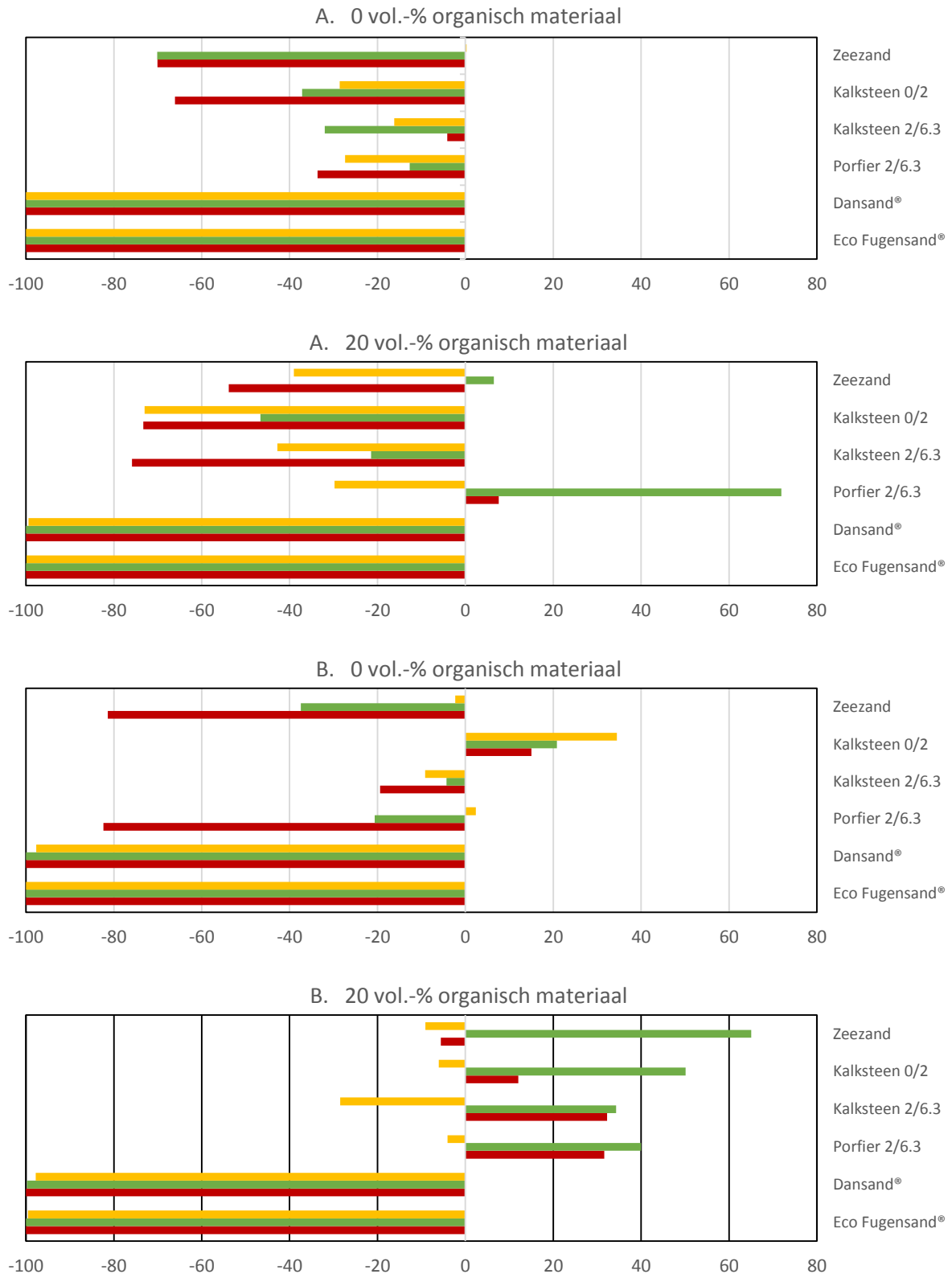
Exp. 1.2; neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 17 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.3: neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 10 neerslagdagen maand⁻¹

Significante verschillen werden gezocht tussen neerslagregimes voor elke combinatie plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad en tussen de vervuilingsgraden voor elke combinatie plantensoort x voegvulling x neerslagregime. Data met dezelfde letter (verticaal per voegvulling) of hetzelfde teken (horizontaal per plantensoort) zijn niet significant verschillend bij P = 0.05. Indien er geen tekens werden toegekend, zijn er geen significante verschillen tussen vervuilingsgraden. Indien er geen letters werden toegekend, zijn er geen significante verschillen tussen experimenten (neerslagregimes).

Statistische verwerking gebeurde met ANOVA indien mogelijk, anders werd een pairwise t-test met Bonferroni correctie gebruikt.

4.1 Experiment 1



Figuur 11: Verschillen in relatieve groeirespons van paardenbloem (grafieken A) en Engels raaigras (grafieken B), 32 dagen na inzaai, naargelang de voegvulling en neerslagregime bij 0 vol.-% en 20 vol.-% organische vervuiling; Geel: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand⁻¹; Groen: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand⁻¹; Rood: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand⁻¹. De groeirespons werd uitgedrukt als procentuele verandering in droge biomassa relatief t.o.v. de droge biomassa-accumulatie in wit kwartsand. Bij -100 % komt er dus geen onkruidgroei voor, terwijl positieve waarden duiden op meer onkruidgroei dan in wit kwartsand.

4.1 Experiment 1

Tabel 14: Opkomst van paardenbloem, 2 en 4 weken na inzaai (WNZ), uitgedrukt als procentuele opkomst van het aantal zaden per potje in functie van voegvulling, vervuilingsgraad en neerslagregime. De waarden zijn het gemiddelde $\pm$ standaardfout van de 4 herhalingen.

		0 vol.-%			5 vol.-%			10 vol.-%			20 vol.-%		
Voegvulling	Neerslagregime	2 WNZ	4 WNZ		2 WNZ	4 WNZ		2 WNZ	4 WNZ		2 WNZ	4 WNZ	
Klassieke ongebonden materialen													
Wit kwartszand	Exp. 1.1	78 ± 4.2	71 ± 5	†	67 ± 6.4	67 ± 8.4		67 ± 3	68 ± 3.3		74 ± 2	79 ± 4.1	
	Exp. 1.2	49 ± 16.9	59 ± 17.2		72 ± 11	56 ± 18.8		76 ± 2.8	80 ± 1.6		74 ± 5.3	71 ± 4.4	
	Exp. 1.3	46 ± 18.2	35 ± 21.4		50 ± 17	44 ± 15.5		46 ± 10.6	43 ± 14.3		68 ± 15.1	61 ± 21	
Zeezand	Exp. 1.1	62 ± 4.8	68 ± 3.7	*	77 ± 2.5	69 ± 6		56 ± 18.7	54 ± 18.2		78 ± 1.2	71 ± 1.9	*
	Exp. 1.2	35 ± 20.6	31 ± 19.3		73 ± 4.1	63 ± 7.2		46 ± 22.4	42 ± 24.3		78 ± 5.3	78 ± 3.5	
	Exp. 1.3	16 ± 10.5	14 ± 14		25 ± 8.5	44 ± 9.4		19 ± 12.4	22 ± 15.1		36 ± 12.8	41 ± 14.5	
Kalksteen 0/2	Exp. 1.1	47 ± 19.1	57 ± 12.2		62 ± 3.5	58 ± 5.3		74 ± 9	67 ± 7.9		67 ± 1	67 ± 1	
	Exp. 1.2	39 ± 21.4	37 ± 21.4		48 ± 18.8	41 ± 19.5		78 ± 4.8	76 ± 6.7		74 ± 7.4	73 ± 10.9	
	Exp. 1.3	29 ± 16.8	18 ± 15.4		24 ± 16.1	14 ± 14		29 ± 17.7	32 ± 18.8		35 ± 15.9	22 ± 16	
Kalksteen 2/6.3	Exp. 1.1	77 ± 6.6	71 ± 5.7		75 ± 4.4	72 ± 5.2		69 ± 4.1	60 ± 6.7	*	67 ± 4.4	72 ± 4.3	*
	Exp. 1.2	63 ± 4.4	54 ± 11.5		72 ± 6.9	56 ± 19.1		68 ± 5.2	63 ± 4.7		72 ± 4.3	69 ± 7.5	
	Exp. 1.3	42 ± 13.1	39 ± 13.4	*	40 ± 18	41 ± 15.9		43 ± 20.3	48 ± 18.6		14 ± 10.4	17 ± 13.3	
Porfier 2/6.3	Exp. 1.1	69 ± 1	66 ± 3.5		74 ± 6.6	65 ± 5.3		67 ± 1.9	67 ± 1		76 ± 1.6	68 ± 4.6	
	Exp. 1.2	70 ± 4.8	58 ± 19.4		75 ± 3	70 ± 3.8	*	69 ± 2.5	63 ± 8.1		75 ± 3.4	70 ± 4.8	
	Exp. 1.3	50 ± 17	31 ± 15		49 ± 8.2	49 ± 14.3		47 ± 11.6	53 ± 14.3		44 ± 11.5	55 ± 14.3	
Zoutaangerijkte materialen													
Dansand®	Exp. 1.1	1 ± 1	0 ± 0		13 ± 4.1	0 ± 0	*	1 ± 1	0 ± 0		17 ± 5.7	1 ± 1	
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	
Polymeerzanden													
Eco Fugensand®	Exp. 1.1	2 ± 2	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		1 ± 1	2 ± 2	
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	

Exp. 1.1: neerslagrijk regime (64.26 L m⁻² maand⁻¹) met 31 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.2; neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 17 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.3: neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 10 neerslagdagen maand⁻¹

Statistische verwerking gebeurde met een paired t-test; *: P < 0.05, †: P < 0.01. Data binnen iedere factorcombinatie voegvulling x vervuilingsgraad x neerslagregime zonder asterisk of obelisk zijn niet significant verschillend.

4.1 Experiment 1

Tabel 15: Opkomst van Engels raaigras, 2 en 4 weken na inzaai (WNZ), uitgedrukt als procentuele opkomst van het aantal zaden per potje in functie van voegvulling, vervuilingsgraad en neerslagregime. De waarden zijn het gemiddelde $\pm$ standaardfout van de 4 herhalingen.

		0 vol.-%		5 vol.-%		10 vol.-%		20 vol.-%					
Voegvulling	Neerslagregime	2 WNZ	4 WNZ	2 WNZ	4 WNZ	2 WNZ	4 WNZ	2 WNZ	4 WNZ	2 WNZ	4 WNZ		
Klassieke ongebonden materialen													
Wit kwartszand	Exp. 1.1	90 ± 3.5	80 ± 4.3	*	90 ± 5	75 ± 4.1	*	89 ± 4.1	81 ± 4.1	*	76 ± 14.7	75 ± 9.6	
	Exp. 1.2	89 ± 2.5	87 ± 5.3		90 ± 2.6	91 ± 1.9		94 ± 3.5	91 ± 1.9		92 ± 4.9	88 ± 8.5	
	Exp. 1.3	96 ± 1.6	84 ± 9.1		86 ± 8.2	76 ± 11		86 ± 4.8	85 ± 3.4		72 ± 24.2	74 ± 22.1	
Zeezand	Exp. 1.1	90 ± 6	86 ± 2		89 ± 3	79 ± 3.4	†	73 ± 23.2	64 ± 21.7	*	83 ± 5.3	74 ± 6.2	†
	Exp. 1.2	89 ± 4.1	85 ± 5.5		93 ± 1.9	90 ± 2	*	70 ± 23.5	62 ± 20.9	*	90 ± 6.6	93 ± 4.1	
	Exp. 1.3	9 ± 5.3	21 ± 17.2		66 ± 22.1	73 ± 24.4		27 ± 15.8	50 ± 16.7		58 ± 20.4	67 ± 22.6	
Kalksteen 0/2	Exp. 1.1	96 ± 0	90 ± 1.2	*	96 ± 1.6	87 ± 3		95 ± 2.5	87 ± 2.5		92 ± 3.7	87 ± 4.4	
	Exp. 1.2	94 ± 2.6	94 ± 1.2		94 ± 1.2	92 ± 2.8		73 ± 16.8	68 ± 14.7		96 ± 2.3	93 ± 3	
	Exp. 1.3	34 ± 21.9	44 ± 22		22 ± 22	63 ± 19.3		81 ± 9.1	80 ± 11.2		58 ± 20.8	92 ± 3.3	
Kalksteen 2/6.3	Exp. 1.1	92 ± 2.8	87 ± 4.1		96 ± 1.6	89 ± 3		94 ± 2.6	82 ± 4.2	*	94 ± 3.5	83 ± 3	*
	Exp. 1.2	90 ± 2	88 ± 0		85 ± 3	88 ± 4.9		96 ± 2.8	88 ± 6.7		90 ± 1.2	91 ± 3	
	Exp. 1.3	63 ± 15.4	73 ± 11.7		74 ± 9	78 ± 8.4		68 ± 7.1	85 ± 7.5	*	56 ± 16.1	84 ± 7.3	*
Porfier 2/6.3	Exp. 1.1	95 ± 1.9	84 ± 1.6	*	96 ± 1.6	82 ± 6.2		91 ± 2.5	84 ± 4		94 ± 2.6	87 ± 3	*
	Exp. 1.2	81 ± 10	75 ± 4.7		94 ± 3.5	88 ± 4	*	86 ± 3.5	83 ± 4.1		90 ± 3.5	88 ± 4.3	
	Exp. 1.3	27 ± 12.2	25 ± 15.6		77 ± 10.8	78 ± 11		57 ± 16.6	79 ± 14.5		46 ± 16.5	72 ± 8.6	*
Zoutaangerijkte materialen													
Dansand®	Exp. 1.1	3 ± 1.9	3 ± 1		10 ± 3.8	10 ± 3.8		26 ± 18.1	20 ± 11.9		16 ± 6.3	15 ± 7.7	
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		28 ± 10.6	7 ± 4.1	
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	
Polymeerzanden													
Eco Fugensand®	Exp. 1.1	0 ± 0	0 ± 0		2 ± 2	1 ± 1		3 ± 3	4 ± 4		1 ± 1	2 ± 1.2	
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	

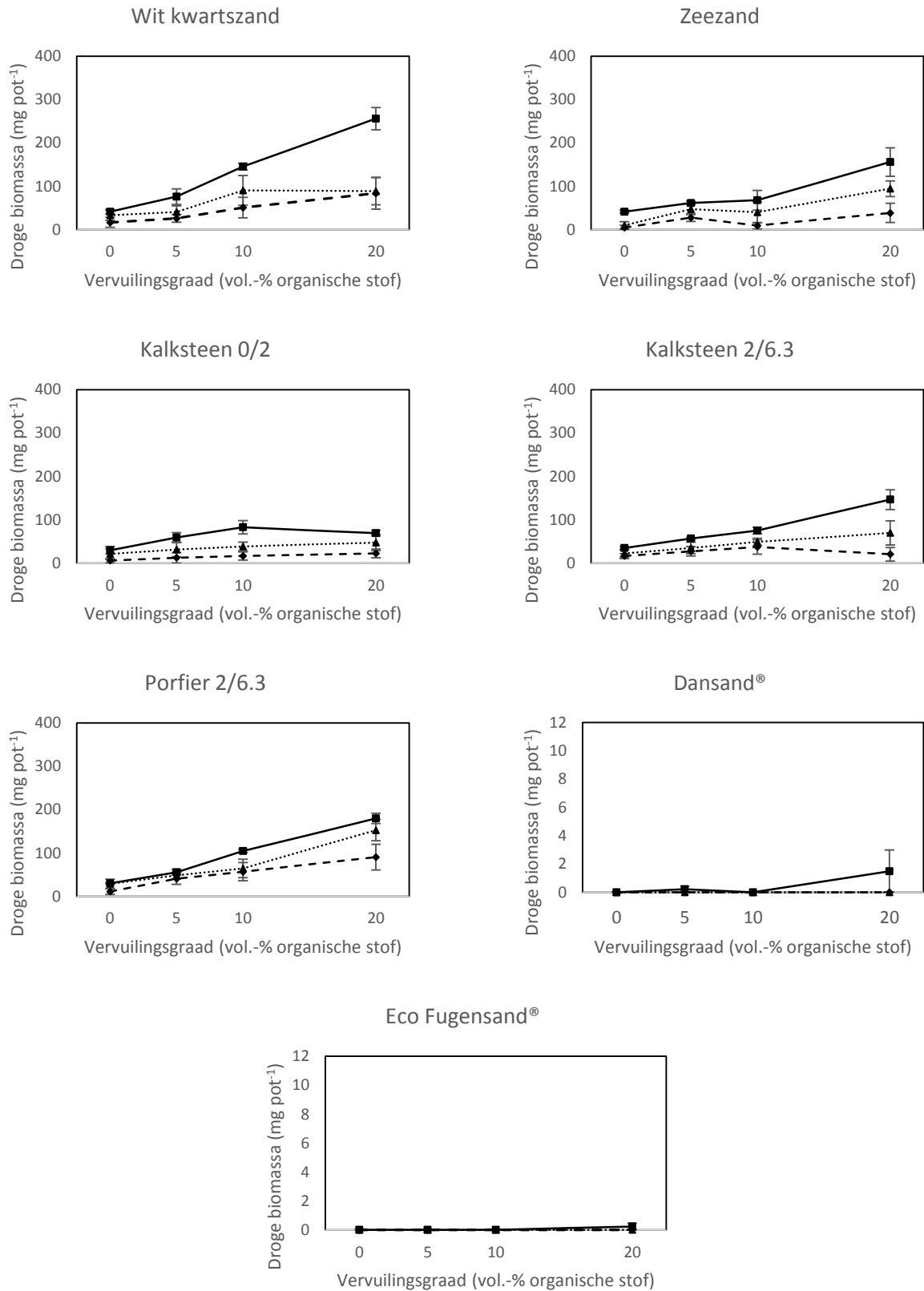
Exp. 1.1: neerslagrijk regime (64.26 L m⁻² maand⁻¹) met 31 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.2; neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 17 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.3: neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 10 neerslagdagen maand⁻¹

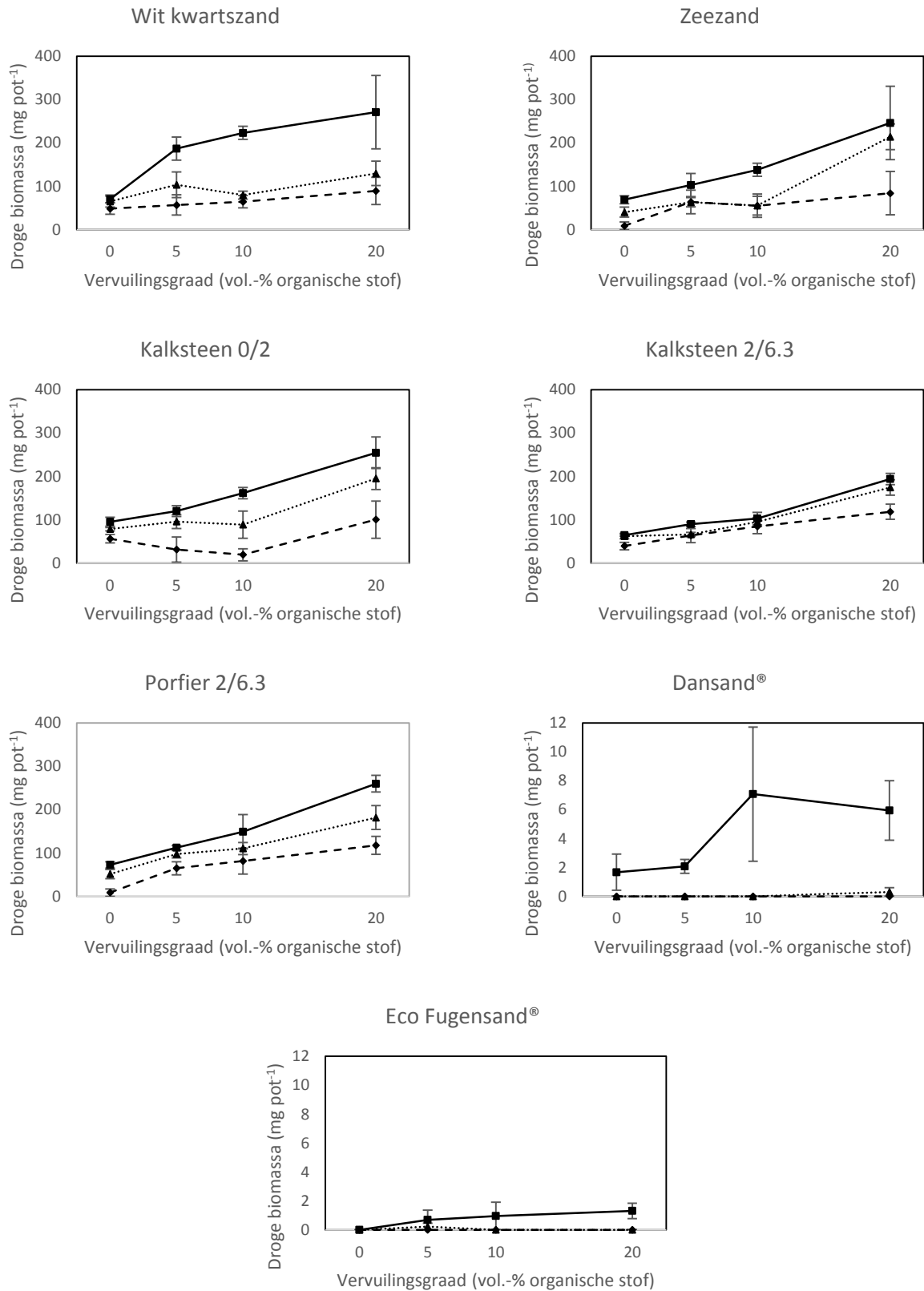
Statistische verwerking gebeurde met een paired t-test; *: P < 0.05, †: P < 0.01. Data binnen iedere factorcombinatie voegvulling x vervuilingsgraad x neerslagregime zonder asterisk of obelisk zijn niet significant verschillend.

4.1 Experiment 1



Figuur 12: Droge biomassa (met bijhorende standaardfout) van paardenbloem (32 dagen na inzaai) per voegvulling voor de verschillende vervuilingsgraden en neerslagregimes (■: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand⁻¹; ▲: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand⁻¹; ◆: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand⁻¹).

4.1 Experiment 1



Figuur 13: Droge biomassa (met bijhorende standaardfout) van Engels raigras (32 dagen na inzaai) per voegvulling voor de verschillende vervuilingsgraden en neerslagregimes (■: neerslagrijk regime (64.26 L m⁻² maand⁻¹) met 31 neerslagdagen maand⁻¹; ▲: neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 17 neerslagdagen maand⁻¹; ◆: neerslagarm regime (27.64 L m⁻² maand⁻¹) met 10 neerslagdagen maand⁻¹).

4.1.2. Discussie

Er zijn duidelijke verschillen in onkruidwerend vermogen tussen voegvullingen en dit bij zowel paardenbloem als Engels raaigras. Bij een neerslagrijk regime (Exp. 1.1) bijvoorbeeld zijn kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3 van alle zuivere klassieke ongebonden materialen het meest onkruidwerend ten opzichte van paardenbloem. Ten opzichte van Engels raaigras is kalksteen 2/6.3 van alle zuivere klassieke ongebonden materialen nog steeds het meest onkruidwerend bij een neerslagrijk regime, kalksteen 0/2 is hier echter het minst onkruidwerend. Bij vervuiling treedt slechts een beperkt aantal veranderingen in relatieve onkruidwerendheid op. Ook in onderzoek van De Cauwer *et al.* (2014) waren bij een gelijkaardige proefopzet bij 20 vol.-% organische vervuiling zeezand, kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3 het meest onkruidwerend ten opzichte van paardenbloem. Desondanks zijn er ook enkele afwijkingen aanwezig doorheen de vervuilingsgraden, zoals voor porfier 2/6.3. Porfier 2/6.3 is in zuivere toestand immers – net als kalksteen 2/6.3 – relatief goed onkruidwerend omwille van de lage hoeveelheid plantbeschikbaar vocht. Zodra er echter organische vervuiling optreedt, verhoogt dit organische materiaal de hoeveelheid plantbeschikbaar vocht gevoelig en verliest porfier 2/6.3 veel van zijn onkruidwerendheid, ongeacht de plantensoort (Boonen *et al.*, 2013). Dit is in lijn met bevindingen van De Cauwer *et al.* (2014).

Bovendien is het onkruidwerend vermogen van een voegvulling **plantensoortspecifiek**. Zuiver kalksteen 0/2 is bij een neerslagrijk regime (Exp. 1.1) bijvoorbeeld heel onkruidwerend ten opzichte van paardenbloem (29 % minder biomassa en 20 % minder kiemplanten na 4 weken relatief t.o.v. wit kwartszand). Het is echter zwak onkruidwerend ten opzichte van Engels raaigras (34 % meer biomassa en 13 % minder kiemplanten na 4 weken relatief t.o.v. wit kwartszand). Deze plantensoort-afhankelijkheid van het onkruidwerend vermogen werd ook reeds opgemerkt door De Cauwer *et al.* (2014), zij het met andere plantensoorten. De innovatieve materialen onderdrukken beide plantensoorten nagenoeg volledig en zijn bijgevolg erg onkruidwerend zowel in zuivere als organisch vervuilde toestand.

Onderzoek van Boonen *et al.* (2013) legde gelijkaardige verschillen in onkruidwerendheid tussen voegvullingen bloot. Zo werd paardenbloem groeiend in voegvullingen met 10 vol.-% organische vervuiling het sterkst geremd in zeezand, gevolgd door kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3, net als in dit experiment. Het onderzoek van Boonen *et al.* (2013) rapporteert bij deze vervuilingsgraad echter dat porfier 2/6.3 zo'n 30 % meer droge biomassa vertoont dan wit kwartszand, terwijl in dit experiment porfier 2/6.3 21 % minder droge biomassa vertoont dan wit kwartszand. De reden hiervoor kan enerzijds liggen bij de aard van het materiaal (wisselende kwaliteit van wit kwartszand en porfier 2/6.3 naargelang producent) en anderzijds bij de omgevingscondities die verschillend zijn. Hoewel er dus zeker een invloed is van de plantensoort op het onkruidwerend vermogen van voegvullingsmaterialen, kan deze invloed sterk variëren naargelang abiotische factoren.

Het verschil in onkruidwerend vermogen ten aanzien van verschillende plantensoorten is voornamelijk te wijten aan zouttolerantie; Engels raaigras is erg zouttolerant terwijl paardenbloem eerder zoutgevoelig is (zie Tabel 8). Voegvullingen met een hoog natriumgehalte (zie Tabel 7) presteren over het algemeen beter in de bestrijding van paardenbloem. Daarnaast kan ook het bewortelingssysteem van de plant een rol spelen bij materialen die uitharden of (onder vochtige omstandigheden) plastisch worden. Grote weegbree zal in een jong stadium bijvoorbeeld met behulp van de lange penwortel veel

4.1 Experiment 1

nutriënten uit diepe grondlagen halen (Warren, 1957), maar moet hiervoor wel eerst door het materiaal kunnen penetreren terwijl Engels raaigras een vertakt oppervlakkig wortelstelsel bezit.

Behalve de plantensoort, heeft ook het **neerslagregime** een duidelijke invloed op het onkruidwerend vermogen van de voegvullingen. Een hoger neerslagvolume (bijvoorbeeld $64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$ zoals in Exp. 1.1) zorgt steeds voor meer biomassa dan een laag neerslagvolume (bijvoorbeeld $27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$ zoals in Exp. 1.2 of 1.3), ongeacht de vervuilingsgraad of de plantensoort. Afhankelijk van de duur van neerslagloze periodes in het neerslagarm regime, bedraagt dit verschil in biomassa 3 tot 320 % (korte neerslagloze periodes) of 21 tot 747 % (lange neerslagloze periodes). Ook het aantal kiemplanten is in het neerslagrijk regime doorgaans groter dan dat in de neerslagarme regimes. Na 4 weken bedraagt dit verschil in aantal kiemplanten -20 tot +219 % (korte neerslagloze periodes) of -5 tot +486 % (lange neerslagloze periodes). De verschillen in aantal planten zijn doorgaans kleiner dan de verschillen in biomassa; de planten zijn dus gemiddeld groter in een neerslagrijk regime dan in een neerslagarm regime.

Niet enkel het neerslagvolume heeft een impact op het onkruidwerend vermogen van voegvullingen; ook het aantal neerslagdagen (of dus de duur van neerslagloze perioden) beïnvloedt zowel de biomassa-accumulatie als het aantal kiemplanten. Bij een neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) zorgen korte neerslagloze periodes (Exp. 1.2) immers voor toenames van 0 tot 478 % biomassa en voor -15 tot +406 % meer planten ten opzichte van lange neerslagloze periodes (Exp. 1.3).

De reactie op het neerslagregime varieert naargelang de plantensoort die aanwezig is. Zo is het minimale verschil in biomassa tussen het neerslagrijk regime (Exp. 1.1) en het neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2) voor beide plantensoorten 3 %, maar is het maximale verschil voor paardenbloem 320 % en voor Engels raaigras slechts 179 %. Daarnaast zijn er bijvoorbeeld 24 tot 386 % meer paardenbloemplanten aanwezig in het neerslagrijk regime dan in het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen (Exp. 1.3), terwijl het verschil in aantal planten Engels raaigras -5 tot +310 % bedraagt.

Dat zowel het neerslagvolume als het aantal neerslagdagen een invloed heeft op de groei van planten, is geen verrassing. Planten kunnen immers meer nutriënten opnemen indien veel water in het substraat aanwezig is, wat bereikt wordt door veel én gespreid te beregenen. De grote discrepantie in biomassa-productie bij paardenbloem tussen een neerslagrijk (Exp. 1.1) en een neerslagarm regime (Exp. 1.2 of 1.3) is eerder verrassend. Paardenbloem zou namelijk een erg droogtetolerante plant moeten zijn (zie Tabel 8), in tegenstelling tot Engels raaigras dat gevoelig is aan droogte (Sanalkumar *et al.*, 2013). Een verklaring hiervoor is vermoedelijk te vinden in het feit dat enkel de bovengrondse biomassa geoogst werd; de penwortel van paardenbloem omvat 75 % van de totale droge biomassa (Bogaert, 2013). Bovendien heeft onderzoek reeds uitgewezen dat paardenbloem een vertraagde groei vertoont en klein blijft bij droogte (Molina-Montenegro *et al.*, 2010).

4.2. Experiment 2

4.2.1. Resultaten

Figuur 14 visualiseert de biomassa-accumulatie, 32 dagen na inzaai van paardenbloem en Engels raaigras, in zuivere en organisch vervuilde voegvullingsmaterialen. De innovatieve materialen Dansand® en Eco Fugensand® lijken het meest onkruidwerend te zijn, gevolgd door kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3.



Figuur 14: Biomassa-accumulatie voor paardenbloem (links) en Engels raaigras (rechts) bij diverse voegvullingen en vervuilingsgraden. De voegvullingsmaterialen zijn v.l.n.r. wit kwartszand, zeezand, kalksteen 0/2, Dansand®, Eco Fugensand®, porfier 2/6.3 en kalksteen 2/6.3. De vervuilingsgraad van het materiaal is van boven naar onder: 20 vol.-%; 10 vol.-%; 5 vol.-%; 0 vol.-% organisch materiaal.

De biomassa's van experiment 2, 59 dagen na inzaai geoogst, zijn weergegeven in Tabel 16 samen met de biomassa's van experiment 1 die 32 dagen na inzaai werden geoogst. In de serreproef (dit is experiment 2) vertoont zeezand van alle zuivere klassieke ongebonden materialen het grootste onkruidwerend vermogen ten opzichte van paardenbloem. Daarna volgen kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3. Doorheen de vervuilingsgraden treden er verschuivingen op in de ranking van de klassieke ongebonden materialen volgens onkruidwerend vermogen, maar gemiddeld gezien blijven de drie bovengenoemde materialen het meest onkruidwerend. Ten opzichte van Engels raaigras laat wit kwartszand het minst onkruidgroei toe van alle zuivere klassieke ongebonden materialen. Het tweede en derde beste materiaal in zuivere toestand zijn zeezand en porfier 2/6.3. Ook ten opzichte van Engels raaigras zijn er bij wisselende vervuilingsgraden veranderingen merkbaar in het relatief onkruidwerend vermogen van de klassieke ongebonden materialen. Zo is wit kwartszand het beste materiaal in zuivere toestand maar het op één na minst onkruidwerend materiaal bij 10 vol.-% vervuiling. Beide innovatieve materialen Dansand® en Eco Fugensand® vertonen geen onkruidgroei in de serreproef, ongeacht de plantensoort of de vervuilingsgraad.

In de helft van de geteste factorcombinaties zijn er significante verschillen in droge biomassa aanwezig tussen de vervuilingsgraden, met telkens hogere biomassa's bij hogere vervuilingsgraden (zie Tabel 16). Ook hier zijn verschillen merkbaar naargelang de plantensoort aangezien er voor paardenbloem slechts twee (bij zeezand en kalksteen 0/2) en voor Engels raaigras vijf (alle klassieke ongebonden materialen) significante verschillen aanwezig zijn.

Het aantal planten (zie Tabel 17) paardenbloem per potje na 2, 4 en 8 weken vertoont geen eenduidige trend; zowel stijgingen als dalingen in plantaantal werden opgemeten (gaande van een daling van 18

opkomst-%²³ tot een stijging van 8 opkomst-% tussen twee opeenvolgende tellingen). Bij Engels raaigras komen tussen twee opeenvolgende tellingen dalingen voor tot 17 opkomst-% en stijgingen van maximaal 2 opkomst-%. Er werd bij Engels raaigras slechts in 3 factorcombinaties 8 weken na inzaai een hoger aantal planten geteld dan 4 weken na inzaai, 4 weken na inzaai is het plantaantal nooit hoger dan 2 weken na inzaai. Bij Engels raaigras is er dus doorgaans een afname in plantaantal merkbaar, onafhankelijk van de vervuilingsgraad of de voegvulling.

In totaal werden slechts 4 significante verschillen vastgesteld in het plantaantal tussen twee opeenvolgende tellingen; één voor paardenbloem (significante stijging) en drie voor Engels raaigras (telkens een significante daling). Opvallend is dat het plantaantal van paardenbloem stijgt bij zowel kalksteen 0/2 als kalksteen 2/6.3 naarmate het materiaal meer organische vervuiling bevat, de andere materialen vertonen geen dergelijke trend ongeacht de plantensoort.

Verskil in onkruidwerendheid tussen kunstmatige en semi-natuurlijke omstandigheden

Het valt op dat de serreproef in 57 % van de geteste factorcombinaties (naargelang plantensoort, vervuilingsgraad en voegvulling) meer biomassa-accumulatie heeft dan elke groeikamerproef (verticale vergelijking in Tabel 16). Slechts in 13 % van alle factorcombinaties is dit echter significant meer. Dit is afhankelijk van de plantensoort; 71 % van deze significante verschillen komen voor bij Engels raaigras. Er is weinig variatie in aantal significante verschillen tussen voegvullingsmaterialen of vervuilingsgraden. Slechts in één factorcombinatie – namelijk bij groei van paardenbloem in 5 vol.-% organisch vervuild zeezand – vertoont de serreproef minder biomassa-accumulatie dan elke groeikamerproef.

Zoals hierboven reeds aangehaald werd, zijn er in de serreproef significante verschillen in droge biomassa aanwezig tussen vervuilingsgraden in de helft van de geteste factorcombinaties (horizontale vergelijking in Tabel 16). Dit is afhankelijk van de plantensoort. Voor Engels raaigras is er bij 5 van de 7 voegvullingen een significant effect van vervuilingsgraad op biomassa-ontwikkeling terwijl dit voor paardenbloem bij slechts 2 van de 7 voegvullingen het geval is. In de groeikamerproeven (Exp. 1) is het aantal significante verschillen tussen vervuilingsgraden echter niet afhankelijk van de plantensoort (zie Tabel 13). Net zoals in de groeikamerproeven, neemt de biomassa in de serreproef significant toe naarmate de vervuilingsgraad stijgt.

Voor paardenbloem verschilt de plantopkomst in de serreproef (Tabel 17) enigszins van de plantopkomst in de groeikamerproeven (Tabel 14). Voor het opkomstpercentage 2 weken na inzaai werd voor elke factorcombinatie voegvulling x vervuilingsgraad het verschil berekend tussen de serreproef enerzijds en de drie groeikamerproeven (Exp. 1.1, 1.2 en 1.3) anderzijds. De mediaanwaarden voor deze verschillen zijn respectievelijk -7 opkomst-%, -5 opkomst-% en +9 opkomst-%, hetgeen betekent dat de opkomst van de serreproef slechter was dan bij het neerslagrijk regime en het neerslagarm regime met veel neerslagdagen (respectievelijk Exp. 1.1 en 1.2) en beter was dan bij het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen (Exp. 1.3). Bij de telling 4 weken na inzaai zijn de mediaanwaarden gelijkaardig. De correlatie met de groeikamerproeven is in zekere mate afhankelijk van de voegvulling en de vervuilingsgraad; bij wit kwartszand vertoont de serreproef

²³ Dit zijn absolute verschillen

4.2 Experiment 2

bijvoorbeeld maximaal 12 opkomst-% verschil met het neerslagrijk regime (Exp. 1.1) (bij 10 vol.-% vervuiling) terwijl dit verschil bij zeezand minimaal 18 opkomst-% (bij 0 vol.-% vervuiling) bedraagt.

Ook voor Engels raaigras verschilt de plantopkomst in de serreproef (Tabel 17) van de plantopkomst in de groeikamerproeven (Tabel 15), maar veel minder uitgesproken dan van paardenbloem. Voor Engels raaigras zijn de mediaanwaarden voor het verschil in opkomstpercentage na 2 weken tussen de serreproef en de groeikamerproeven respectievelijk -3 opkomst-%, -0 opkomst-% en +12 opkomst-%. De opkomst van de serreproef was dus slechter dan bij het neerslagrijk regime (Exp. 1.1) en beter dan bij het neerslagarm regime met weinig neerslagdagen (Exp. 1.3). 4 weken na inzaai worden gelijkaardige mediaanwaarden bekomen. Het opkomstpercentage voor Engels raaigras is in de serreproef dus erg gelijklopend met de groeikamerproeven met neerslagrijk regime (Exp. 1.1) en neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2). Voor Engels raaigras is de correlatie met de groeikamerproeven weinig afhankelijk van het voegvullingsmateriaal.

Het aantal planten in de serreproef is – net als in de groeikamerproeven met neerslagrijk regime (Exp. 1.1) en met neerslagarm regime met veel neerslagdagen (Exp. 1.2) – doorgaans hoger na 2 weken dan na 4 weken voor zowel paardenbloem als voor Engels raaigras; de mediaan is een daling van 2 opkomst-% met interkwartielafstand van 5 opkomst-%. Slechts in 7 % van de geteste factorcombinaties in de serreproef is een stijging in plantaantal doorheen de tijd merkbaar.

Voor de droge biomassa's per potje zijn er goede correlaties aanwezig tussen de serreproef enerzijds en de groeikamerproeven anderzijds; alle determinatiecoëfficiënten R^2 zijn groter dan 0.409 (zijnde de determinatiecoëfficiënt voor paardenbloem tussen de serreproef en de groeikamerproef met neerslagarm regime en weinig neerslagdagen (Exp. 1.3)). Vooral voor Engels raaigras zijn grote correlaties aanwezig (tot $R^2 = 0.864$ voor het neerslagrijk regime (Exp. 1.1)). Aangezien R^2 bij paardenbloem gemiddeld kleiner is dan R^2 bij Engels raaigras, werd deze data opgesplitst per vervuilingsgraad (Tabel 19), waaruit blijkt dat de correlatie sterk varieert naargelang de vervuiling. Geen enkele van de drie groeikamerproeven vertoont bij paardenbloem voor elke vervuilingsgraad significante correlaties met de serreproef. Binnen de vervuilingsgraad van 20 vol.-% zijn alle groeikamerproeven evenwel significant gecorreleerd met de serreproef.

4.2 Experiment 2

Tabel 16: Gemiddelde droge biomassa (mg pot^{-1}) $\pm$ standaardfout in functie van voegvulling, vervuilingsgraad en neerslagregime bij oogst (32 dagen na inzaai, behalve voor de serreproef: 59 dagen na inzaai).

		Paardenbloem				Engels raaigras			
Voegvulling	Neerslagregime	0 vol.-%	5 vol.-%	10 vol.-%	20 vol.-%	0 vol.-%	5 vol.-%	10 vol.-%	20 vol.-%
Klassieke ongebonden materialen									
Wit kwartszand	Exp. 1.1	42 ± 5.2 a	76 ± 18	146 ± 7.8	256 ± 25.8 b	71 ± 9.1	187 ± 26.7 b	223 ± 15.1 b	271 ± 84.6 a
	Exp. 1.2	33 ± 12.1 a	41 ± 13.8	91 ± 34.1	89 ± 31.5 a	65 ± 12.6	104 ± 29.4 ab	80 ± 9.3 a	130 ± 28 a
	Exp. 1.3	17 ± 11.4 a	26 ± 8.7	51 ± 23.9	84 ± 36.5 a	49 ± 13.4	57 ± 23.5 a	65 ± 14.4 a	89 ± 31.3 a
	Serre	133 ± 34.8 b	99 ± 41.9	111 ± 27.6	123 ± 39.5 ab	70 ± 4.7 *	154 ± 16.3 b*	216 ± 53 b*	511 ± 111.8 b†
Zeezand	Exp. 1.1	42 ± 3.2 b	62 ± 4 b	68 ± 22.8 ab	156 ± 32.8	69 ± 10.4 b	103 ± 22.1	138 ± 46.4 b	246 ± 54 ab
	Exp. 1.2	10 ± 8.6 a	47 ± 11.9 ab	40 ± 23.8 ab	95 ± 18.2	41 ± 11.4 ab	64 ± 10.7	55 ± 21.8 a	214 ± 29.7 ab
	Exp. 1.3	5 ± 5.1 a	28 ± 8.7 ab	9 ± 7.3 a	39 ± 22	9 ± 8.9 a	64 ± 27.1	55 ± 26.8 a	84 ± 49.7 a
	Serre	17 ± 7.9 ab*	18 ± 12.1 a*	127 ± 42.9 b†	139 ± 54 †	78 ± 17.3 b*	85 ± 5.5 *	189 ± 41.3 b†	398 ± 100 b†
Kalksteen 0/2	Exp. 1.1	30 ± 8.7	59 ± 11.4	83 ± 15.4	69 ± 6.5	95 ± 10.3 ab	120 ± 12.6 bc	161 ± 13.1 c	255 ± 36.4 bc
	Exp. 1.2	21 ± 12.2	31 ± 16.9	38 ± 10	47 ± 18.5	78 ± 3.9 ab	96 ± 15.9 ab	89 ± 31.2 b	195 ± 25.2 ab
	Exp. 1.3	6 ± 5	12 ± 12	16 ± 9.5	22 ± 9.9	56 ± 9.8 a	31 ± 29.1 a	19 ± 13.7 a	100 ± 42.8 a
	Serre	27 ± 14.1 *	30 ± 18.3 *†	73 ± 25.9 †‡	62 ± 16.3 ‡	122 ± 18.9 b*	170 ± 11.7 c*†	201 ± 20 c†	371 ± 27.6 c‡
Kalksteen 2/6.3	Exp. 1.1	35 ± 3	56 ± 2.8	75 ± 7.7	146 ± 22.8 b	64 ± 2.3	90 ± 5.2 a	103 ± 14.5 a	194 ± 13.2 b
	Exp. 1.2	23 ± 7.8	35 ± 13.3	49 ± 8.4	70 ± 27.9 ab	62 ± 6.2	66 ± 4.7 a	95 ± 10.5 a	174 ± 17.7 b
	Exp. 1.3	16 ± 5.7	27 ± 11.2	37 ± 16.6	20 ± 15.5 a	39 ± 8.4	63 ± 16.2 a	85 ± 16.5 a	118 ± 17.5 a
	Serre	82 ± 36	103 ± 42.5	93 ± 33.3	90 ± 35.3 ab	87 ± 23.2 *	132 ± 13.4 b*	208 ± 7.5 b†	324 ± 18.7 c‡
Porfier 2/6.3	Exp. 1.1	30 ± 1.6 a	56 ± 6.7	104 ± 4.1	180 ± 11.6	72 ± 7.4 bc	112 ± 5.2 a	149 ± 39.6 ab	260 ± 19.1 b
	Exp. 1.2	29 ± 10.7 a	48 ± 8	65 ± 21.4	153 ± 24.6	52 ± 10.5 b	97 ± 8.4 a	110 ± 14 ab	182 ± 27.5 ab
	Exp. 1.3	11 ± 6.3 a	41 ± 12.9	57 ± 21.2	90 ± 29.7	9 ± 8.4 a	65 ± 15.1 a	81 ± 30 a	118 ± 20.9 a
	Serre	155 ± 39.9 b	131 ± 55.9	102 ± 29.3	112 ± 30	86 ± 4.4 c*	171 ± 20 b†	356 ± 52.4 b‡	548 ± 43.5 c‡
Zoutaangerijkte materialen									
Dansand®	Exp. 1.1	0 ± 0	0 ± 0.2	0 ± 0	2 ± 1.5	2 ± 1.3	2 ± 0.5 b	7 ± 4.6 b	6 ± 2.1 b
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0.3 a
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
	Serre	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
Polymeerzanden									
Eco Fugensand®	Exp. 1.1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0.2	0 ± 0	1 ± 0.7	1 ± 1	1 ± 0.5 b
	Exp. 1.2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0.2	0 ± 0	0 ± 0 a
	Exp. 1.3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 a
	Serre	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0 a

Exp. 1.1: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.2; neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand⁻¹

Exp. 1.3: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand⁻¹

Serre: neerslagrijk regime ($94.92 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand⁻¹

Letters duiden binnen elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad de significante verschillen aan ($P < 0.05$) tussen de experimenten (verticale vergelijking). Indien er geen letters werden toegekend, zijn er geen significante verschillen tussen experimenten (neerslagregimes).

Tekens duiden binnen elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling x neerslagregime van het serre-experiment de significante verschillen aan ($P < 0.05$) tussen de vervuilingsgraden (horizontale vergelijking). Indien er geen tekens werden toegekend, zijn er geen significante verschillen tussen vervuilingsgraden in het serre-experiment. Statistische verwerking gebeurde met ANOVA indien mogelijk, anders werd een pairwise t-test met Bonferroni correctie gebruikt.

4.2 Experiment 2

Tabel 17: Opkomst van paardenbloem (bovenste tabel) en Engels raaigras (onderste tabel) in de serreproef, uitgedrukt als procentuele opkomst van het aantal zaden per potje in functie van voegvulling, vervuilingsgraad en neerslagregime, 2, 4 en 8 weken na inzaai (WNZ). De waarden zijn het gemiddelde $\pm$ standaardfout van de 4 herhalingen.

	0 vol.-%			5 vol.-%				10 vol.-%			20 vol.-%		
	2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ		2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ
Klassieke ongebonden materialen													
Wit kwartszand	71 ± 5.5	72 ± 4.3	74 ± 5	66 ± 3.5	67 ± 1	69 ± 3.4		55 ± 8.9	53 ± 8.9	59 ± 7.2	67 ± 8.9	65 ± 5.3	68 ± 8.2
Zeezand	44 ± 5.2	38 ± 10.4	40 ± 10.6	33 ± 18	31 ± 18.1	39 ± 16.8	†	33 ± 15.9	32 ± 17.4	34 ± 16.4	44 ± 22.1	44 ± 23.4	46 ± 22
Kalksteen 0/2	28 ± 16.2	26 ± 14.1	22 ± 11.6	55 ± 8.4	52 ± 6.9	34 ± 13.7		59 ± 3.4	54 ± 4.8	57 ± 3.4	68 ± 2.8	66 ± 2.6	64 ± 2.8
Kalksteen 2/6.3	37 ± 5.5	34 ± 3.8	39 ± 4.1	54 ± 4.2	49 ± 3.8	51 ± 3.4		56 ± 5.4	55 ± 3.4	50 ± 1.2	67 ± 6.6	69 ± 7	69 ± 5.7
Porfier 2/6.3	71 ± 9.8	60 ± 13.7	60 ± 13	51 ± 12	57 ± 12.9	57 ± 13		65 ± 1.9	62 ± 3.8	60 ± 1.6	67 ± 2.5	65 ± 4.1	66 ± 2.6
Zoutaangerijkte materialen													
Dansand®	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Polymeerzanden													
Eco Fugensand®	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

	0 vol.-%			5 vol.-%				10 vol.-%				20 vol.-%		
	2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ		2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ		2 WNZ	4 WNZ	8 WNZ
Klassieke ongebonden materialen														
Wit kwartszand	89 ± 3.4	86 ± 3.5	88 ± 3.7	89 ± 3.4	84 ± 4.6	74 ± 9		83 ± 4.1	77 ± 5.7	79 ± 2.5		92 ± 3.7	91 ± 2.5	88 ± 4.3
Zeezand	88 ± 2.8	82 ± 4.2	80 ± 8.2	69 ± 12.4	52 ± 10.8	44 ± 8.5	*	77 ± 15	67 ± 17.1	61 ± 15.3	*	93 ± 3	87 ± 3.4	73 ± 8.9
Kalksteen 0/2	96 ± 4	88 ± 6.3	88 ± 5.9	93 ± 3	91 ± 4.1	77 ± 14.1		92 ± 2.8	88 ± 4	90 ± 2		86 ± 8.9	84 ± 6.9	84 ± 8.5
Kalksteen 2/6.3	90 ± 4.8	86 ± 4.8	82 ± 8.4	80 ± 5.7	78 ± 6.6	72 ± 2.3		85 ± 3.4	82 ± 3.8	76 ± 1.6		92 ± 2.3	86 ± 2.6	81 ± 6.8
Porfier 2/6.3	82 ± 4.8	77 ± 7.5	72 ± 7.1	89 ± 4.1	87 ± 3.4	84 ± 4		91 ± 3.8	84 ± 1.6	80 ± 2.3		93 ± 4.7	87 ± 4.4	81 ± 8.1
Zoutaangerijkte materialen														
Dansand®	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
Polymeerzanden														
Eco Fugensand®	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0

Statistische verwerking gebeurde met een paired t-test. Er werd getest op significante verschillen tussen telling 2 WNZ en 4 WNZ (*: $P < 0.05$) en tussen telling 4 WNZ en 8 WNZ (†: $P < 0.05$) telkens binnen elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad. Data zonder asterisk of obelisk zijn niet significant verschillend.

4.2 Experiment 2

Tabel 18: Determinatiecoëfficiënten en bijhorende P-waarden voor de lineaire regressies tussen de droge biomassa van het serre-experiment en de droge biomassa van de drie subexperimenten 1.1, 1.2 en 1.3.

	Paardenbloem		Engels raaigras	
	R ²	P-waarde	R ²	P-waarde
Serre ~ Exp. 1.1	0.423	***	0.864	***
Serre ~ Exp. 1.2	0.483	***	0.815	***
Serre ~ Exp. 1.3	0.409	***	0.755	***

NS: niet significant ($P \geq 0.05$), *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$

Exp. 1.1: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand^{-1}

Exp. 1.2: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand^{-1}

Exp. 1.3: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand^{-1}

Serre: neerslagrijk regime ($94.92 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand^{-1}

Tabel 19: Determinatiecoëfficiënten en bijhorende P-waarden voor de lineaire regressies tussen de droge biomassa van het serre-experiment en de droge biomassa van de drie subexperimenten 1.1, 1.2 en 1.3 voor paardenbloem nadat de data werd opgesplitst volgens de vervuilingsgraden.

	0 vol.-%		5 vol.-%		10 vol.-%		20 vol.-%	
	R ²	P-waarde	R ²	P-waarde	R ²	P-waarde	R ²	P-waarde
Serre ~ Exp. 1.1	0.331	NS	0.433	NS	0.721	*	0.843	**
Serre ~ Exp. 1.2	0.802	**	0.486	NS	0.713	*	0.768	*
Serre ~ Exp. 1.3	0.701	*	0.706	*	0.438	NS	0.602	*

NS: niet significant ($P \geq 0.05$), *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$

Exp. 1.1: neerslagrijk regime ($64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand^{-1}

Exp. 1.2; neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 17 neerslagdagen maand^{-1}

Exp. 1.3: neerslagarm regime ($27.64 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 10 neerslagdagen maand^{-1}

Serre: neerslagrijk regime ($94.92 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$) met 31 neerslagdagen maand^{-1}

4.2.2. Discussie

Verskil in onkruidwerendheid tussen kunstmatige en semi-natuurlijke omstandigheden

De biomassa per potje is in de serreproef (Exp. 2) in 57 % van de factorcombinaties groter dan de biomassa in eender welke groeikamerproef (Exp. 1). Dat de biomassa hoger ligt, is weinig verrassend aangezien de serreproef bijna tweemaal zo lang aangehouden werd als de groeikamerproeven (59 dagen tegenover 32 dagen). Bovendien werd dagelijks beregend, wat – zoals uit vorig experiment blijkt – gunstiger is voor de planten, met een groter volume water ($94.92 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$ tegenover maximaal $64.26 \text{ L m}^{-2} \text{ maand}^{-1}$ in de groeikamerproeven). De reden dat de biomassa – en het aantal kiemplanten overigens ook – per potje niet in elke geteste factorcombinatie hoger is dan elk van de groeikamerproeven ondanks het gunstiger neerslagregime en de langere duur van de proef, is vermoedelijk de erg hoge temperaturen in de serre (zie Tabel 11). Door de koele nachten is de gemiddelde dagtemperatuur slechts beperkt hoger dan in de groeikamerproeven, maar rond het middaguur werden erg hoge temperaturen opgemeten met piektemperaturen tot 50.5°C . Onderzoek van Larcher (1994) wees uit dat planten – afhankelijk van hun plantensoort – bij temperaturen vanaf 36°C reeds een reductie vertonen in fotosynthese.

Net als in de groeikamerproeven, verandert het onkruidwerend vermogen van voegvullingen in de serreproef ten opzichte van de andere voegvullingen bij wisselende vervuilingsgraad. Dit is echter afhankelijk van de plantensoort; met Engels raaigras zijn duidelijkere overeenkomsten zichtbaar tussen de serreproef enerzijds en de groeikamerproeven anderzijds dan met paardenbloem.

Er is over vervuilingsgraden heen een duidelijke significante correlatie tussen de biomassa-accumulatie van paardenbloem in de serreproef (Exp. 2) enerzijds en elk van de groeikamerproeven (Exp. 1) anderzijds (zie Tabel 18). De determinatiecoëfficiënt is evenwel maximaal 0.483. De correlatie tussen de serreproef en de groeikamerproeven is voor paardenbloem duidelijk afhankelijk van de vervuilingsgraad. Zo blijkt er sterke correlatie te zijn met de neerslagrijke groeikamerproef (Exp. 1.1) bij sterk vervuilde materialen (10 of meer vol.-%), maar niet bij zwak vervuilde materialen (5 of minder vol.-%). Bij een vervuilingsgraad van 20 vol.-% organische vervuiling is er steeds een sterke, significante correlatie (determinatiecoëfficiënten begrepen tussen 0.602 en 0.843) tussen de biomassa's van de serreproef enerzijds en de biomassa's van elk van de groeikamerproeven anderzijds. Bij deze vervuilingsgraad – courant voorkomend in voegen van oudere in situ verhardingen (De Cauwer *et al.*, 2014) – kan het onkruidwerend vermogen van voegvullingen betrouwbaar getest worden aan de hand van korte termijn groeikamerproeven.

De biomassa-accumulatie van Engels raaigras in de serreproef (Exp. 2) vertoont sterke, significante correlaties met de biomassa-accumulatie in de groeikamerproeven (Exp. 1) (zie Tabel 18). Zeezand bijvoorbeeld behoort – ongeacht de vervuilingsgraad – tot de twee meest onkruidwerende klassieke ongebonden materialen. Dit is ook het geval in de groeikamerproef met neerslagarm regime en veel neerslagdagen (Exp. 1.2). Ook vertoont porfier 2/6.3 een dalende onkruidwerendheid ten opzichte van de andere materialen bij toenemende vervuiling, wat ook reeds in de groeikamerproeven zichtbaar was. Hoewel de correlatie met alle groeikamerproeven significant is, is deze lager voor de groeikamerproeven met neerslagarm regime (indien veel neerslagdagen; $R^2 = 0.815$, indien weinig neerslagdagen; $R^2 = 0.755$) dan voor de groeikamerproef met neerslagrijk regime ($R^2 = 0.864$).

De sterkere correlatie voor Engels raaigras in vergelijking met de correlatie voor paardenbloem kan wellicht verklaard worden aan de hand van de biologische eigenschappen van de plantensoorten. Ten eerste heeft paardenbloem inherent een minder fijn vertakt wortelstelsel en een kleiner worteloppervlak dan Engels raaigras (De Smet *et al.*, 2012). Daarnaast transpireert paardenbloem

4.2 Experiment 2

sterker wegens zijn groter bladoppervlak (Daepf *et al.*, 2000; Brock & Galen, 2005). Bij hoge temperaturen – zoals in de serre – zal paardenbloem dus veel water verdampen maar minder goed water kunnen opnemen dan Engels raaigras. Wellicht vormt ligt dit aan de basis van de grotere variatie in groeisnelheid bij paardenbloem, waardoor de correlatie daalt met de groeikamerproeven waar geen extreme temperaturen optraden.

Over het algemeen – ongeacht plantensoort of vervuilingsgraad – presteren in de serreproef (Exp. 2) zeezand, kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3 van de geteste klassieke ongebonden materialen het best op onkruidwerend vlak. Deze materialen zijn ook de best presterende materialen in de groeikamerproeven. Dit is weinig verrassend aangezien er duidelijke correlaties aanwezig zijn tussen de serreproef en de groeikamerproeven voor zowel paardenbloem als Engels raaigras. Ook De Cauwer *et al.* (2014) concludeerden reeds dat deze materialen zowel qua plantopkomst als qua bovengrondse biomassa sterker presteren dan wit kwartszand en porfier 2/6.3 voor paardenbloem.

Het zoutaangerijkt materiaal Dansand® laat onder de semi-natuurlijke omstandigheden van de serreproef geen enkele onkruidgroei toe van zowel paardenbloem als Engels raaigras. Aangezien zeezand en kalksteen meer natriumzout bevatten dan wit kwartszand en porfier, zouden zeezand, kalksteen 0/2 en kalksteen 2/6.3 in zuivere toestand onkruidwerender moeten zijn tegenover de zoutgevoelige paardenbloem dan zuiver wit kwartszand en zuiver porfier 2/6.3. De resultaten in experiment 2 bevestigen dat en zijn in lijn met eerdere bevindingen van De Cauwer *et al.* (2013a).

4.3. Experiment 3

4.3.1. Resultaten

Figuur 15 illustreert de biomassa-accumulatie bekomen 62 dagen na inzaai van vijf verschillen plantensoorten in organische vervuilde (20 vol.-%) voegvullingen. Uit deze afbeelding valt op te maken dat de klassieke ongebonden materialen visueel beduidend minder onkruidwerend zijn dan het gros van de gebonden en/of innovatieve materialen. Toch zijn er ook enkele innovatieve materialen (Biozand® en Sibelco® experimenteel zand) die zwak lijken te presteren in vergelijking met andere innovatieve materialen.



Figuur 15: Biomassa-accumulatie bekomen 62 dagen na inzaai van vijf verschillende plantensoorten in organische vervuilde (20 vol.-%) voegvullingen. De voegvullingen zijn v.l.n.r. No Weed – Block paving sand®, Dansand®, Biozand®, Jointex® Easy Joint (kleur: basalt), M-Pflasterfugenmörtel®, Streetprotexion® III, Streetprotexion® I, Seal-all® joint, Techniseal® DR+, Dansand Hard®, Eco Fugensand® (kleur: beige), Eco Fugensand® (kleur: basalt), ijzerslakken, 25 % experimenteel zand + 75 % wit kwartszand, wit kwartszand, zwart kwartszand, zeezand, zand van Lustin, kalksteen 0/2, kalksteen 0/6.3, porfier 2/6.3, kalksteen 2/6.3 en Flowpoint®. De plantensoorten zijn van boven naar onder: Engels raaigras, paardenbloem, straatgras, grote weegbree en gewone hoornbloem.

Gewone hoornbloem wordt relatief goed bestreden door alle zuivere materialen (zie Tabel 20), enkel zand van Lustin vertoont significant meer biomassa-accumulatie na 62 dagen dan alle andere materialen (op zeezand en het experimenteel zand na die geen significante verschillen vertonen). Bij top laagvervuiling en uniforme vervuiling slagen bijna alle niet-experimentele innovatieve materialen en het klassieke gebonden materiaal Flowpoint® er goed in om gewone hoornbloem nagenoeg volledig te onderdrukken. Enkel Biozand® scoort (niet significant) zwakker. Zeezand en zand van Lustin vertonen bij uniforme vervuiling significant meer onkruidgroei dan de klassieke gebonden of niet-experimentele innovatieve materialen. Het experimenteel zand heeft de grootste biomassa gewone hoornbloem bij top laagvervuiling. Bij uniforme vervuiling verschillen naast zeezand en zand van Lustin, ook kalksteen (in alle korrelgroottes) en porfier 2/6.3 significant van de klassieke gebonden materialen en van alle niet-experimentele innovatieve materialen behalve Biozand®. Ook bij deze uniforme vervuiling vertoont het experimenteel zand significant meer onkruidgroei dan de andere innovatieve materialen.

Bij de andere plantensoorten zijn gelijkaardige trends zichtbaar; in zuivere vorm zijn er geen significante verschillen merkbaar tussen de klassieke gebonden of innovatieve materialen op vlak van biomassa-accumulatie na 62 dagen (op groei van straatgras in Biozand® en groei van straatgras en Engels raaigras in het experimenteel zand na). Onder de klassieke ongebonden materialen zijn er telkens slechts enkele materialen (waaronder steeds zand van Lustin) die significant hogere biomassa-accumulaties vertonen ten opzichte van de klassieke gebonden of innovatieve materialen in zuivere

4.3 Experiment 3

toestand. Wit en zwart kwartszand en kalksteen 2/6.3 vertonen in zuivere toestand nooit significant meer biomassa-accumulatie dan de klassieke gebonden of innovatieve materialen. Bij vervuiling treden meer significante verschillen op tussen de materialen. De klassieke gebonden materialen en de innovatieve materialen die in zuivere vorm niet significant verschillend zijn van elkaar, verschillen echter ook bij vervuiling niet significant van elkaar (behalve ijzerslakken bij toplaagvervuiling voor paardenbloem of Engels raaigras).

De klassieke gebonden materialen en de innovatieve materialen (op Biozand® en het experimenteel zand na) hebben doorgaans het meest biomassa-accumulatie bij een toplaagvervuiling. Alle andere materialen hebben daarentegen het meest biomassa-accumulatie bij de uniforme vervuiling. Bij alle klassieke ongebonden materialen en het experimenteel zand vertonen alle plantensoorten behalve paardenbloem een significante hogere biomassa in het uniform vervuild materiaal dan in het zuiver of toplaagvervuild materiaal (behalve straatgras in wit kwartszand). Van al deze materialen is er enkel bij porfier 2/6.3 een significant verschil merkbaar tussen de zuivere en de toplaagvervuilde vorm, namelijk bij groei van Engels raaigras. Bij alle klassieke gebonden of innovatieve materialen (behalve experimenteel zand) zijn er veel minder significante verschillen merkbaar tussen vervuilingsgraden.

Afhankelijk van de plantensoort, is de relatieve onkruidwerendheid van de voegvullingen anders (zie Figuur 16). Een illustratie hiervan is porfier 2/6.3. Deze voegvulling presteert met bijvoorbeeld 20 % vervuiling een heel stuk beter bij paardenbloem (21% meer droge biomassa dan wit kwartszand) dan bij straatgras (223% meer droge biomassa dan wit kwartszand). Het harsgebonden materiaal Streetprotexion® I bestrijdt grote weegbree en paardenbloem 100 %, maar bestrijdt straatgras slechts 71 % beter dan wit kwartszand. Alle voegvullingsmaterialen hebben bepaalde plantensoorten die ze beter kunnen bestrijden, behalve de erg goed presterende voegvullingen zoals Eco Fugensand® (ongeacht de kleur), No Weed - Block paving sand® en Flowpoint®. Deze goed presterende materialen kunnen immers alle plantensoorten bij elke vervuilingvorm uitstekend bestrijden.

Het opkomstpercentage (zie Tabel 21) van gewone hoornbloem is erg hoog voor zuiver zand van Lustin (82 % na 4 weken), dat ook het meest biomassa gewone hoornbloem had over alle zuivere materialen heen. Ook in het experimenteel zand en Biozand® bezit gewone hoornbloem een hoog opkomstpercentage (respectievelijk 83 opkomst-% en 72 opkomst-% na 4 weken), al is de geoogste biomassa hier wel veel lager (respectievelijk 17 en 13 mg t.o.v. 34 mg bij zand van Lustin). Het opkomstpercentage lijkt bijgevolg slechts zwak gecorreleerd te zijn met de geoogste biomassa. Bij het opkomstpercentage van gewone hoornbloem in zuivere voegvullingen is dit ook merkbaar bij StreetProtexion® I waar een opkomst van 22 opkomst-% na 8 weken geassocieerd is met een droge biomassa van 1 mg pot⁻¹ terwijl Jointex® Easy Joint (kleur: basalt) ook 1 mg pot⁻¹ biomassa levert met een opkomst van slechts 3 opkomst-% na 8 weken. Ook bij vervuilde voegvullingsmaterialen gaan hoge biomassa's vaak gepaard met hoge opkomstpercentages, maar zijn hoge opkomstpercentages soms ook aanwezig bij materialen die lagere biomassa-accumulatie vertonen (zo levert zeezand bij uniforme vervuiling 26 mg pot⁻¹ droge biomassa gewone hoornbloem met een opkomst van 77 opkomst-% na 8 weken terwijl uniform vervuild zand van Lustin met 79 opkomst-% 69 mg pot⁻¹ droge biomassa gewone hoornbloem levert). Daarnaast valt op dat opkomstpercentages niet altijd evenredig stijgen met de geoogste biomassa; wit kwartszand heeft na 8 weken bijvoorbeeld een gelijkaardig opkomstpercentage in zuivere toestand als bij uniforme vervuiling (respectievelijk 59 en 58 opkomst-%), terwijl de geoogste biomassa bij uniforme vervuiling 2.46 maal groter is.

4.3 Experiment 3

Voor de andere plantensoorten gelden grosso modo dezelfde bevindingen; hoge biomassa's gaan meestal gepaard met hoge opkomstpercentages en vice versa, maar enige voorzichtigheid is ook hier geboden. Zo is de opkomst van Engels raaigras bij uniform vervuild Biozand® hoger dan dat van uniform vervuild experimenteel zand (93 opkomst-% tegenover 74 opkomst-% na 8 weken), maar is de droge biomassa Engels raaigras lager bij Biozand® (135 mg pot⁻¹ tegenover 294 mg pot⁻¹).

Doorgaans is er weinig verschil in opkomstpercentage tussen telling na 4 en na 8 weken, al zijn er enkele uitschieters aanwezig zoals een daling van 29 opkomst-% van Engels raaigras in top laag vervuild Dansand hard® en een stijging van 26 opkomst-% van straatgras in zuiver Seal-all® joint. Er zijn bijgevolg weinig significante verschillen merkbaar tussen de tellingen na 4 en na 8 weken (4 % van de geteste factorcombinaties, zie Tabel 21). Deze significante verschillen komen voor bij alle plantensoorten (behalve paardenbloem), alle vervuilingsgraden en verschillende voegvullingen uit verschillende voegvullingscategorieën. Als de experimentele materialen en Biozand® buiten beschouwing worden gelaten, is duidelijk dat de klassieke ongebonden materialen voor elke plantensoort het meest opkomst vertonen. Over de overige categorieën kan geen uitspraak gedaan worden omtrent de algemene plantopkomst gezien de grote verscheidenheid tussen materialen binnen elke categorie. Over alle plantensoorten heen vertonen Dansand® en No Weed - Block paving sand® (zoutaangerijkte materialen), M-Pflasterfugenmörtel® (harsgebonden materialen) en Eco Fugensand® (polymeerzanden, ongeacht de kleur) doorgaans het laagste opkomstpercentage van alle materialen, ongeacht de vervuilingsgraad.

4.3 Experiment 3

Tabel 20: Gemiddelde droge biomassa (mg pot⁻¹) ± standaardfout van vijf plantensoorten in functie van voegvulling en vervuilingsgraad, 62 dagen na inzaai.

Voegvulling	Gewone hoornbloem			Paardenbloem			Engels raaigras		
	Zuiver	Toplaag-vervuiling	Uniforme vervuiling	Zuiver	Toplaag-vervuiling	Uniforme vervuiling	Zuiver	Toplaag-vervuiling	Uniforme vervuiling
Klassieke ongebonden materialen									
Wit kwartszand	13 ± 7.6 a*	13 ± 4.5 abc*	32 ± 9.6 abc†	32 ± 12.8 abc*	38 ± 13.5 abcd*	116 ± 45.2 abc*	44 ± 15 abcd*	31 ± 11.7 abc*	167 ± 63.9 e††
Zwart kwartszand	10 ± 6.9 a*	6 ± 3 ab*	26 ± 7.2 ab†	5 ± 5.4 a*	12 ± 4.5 abc*†	95 ± 9.4 abc†	14 ± 11.9 ab*	36 ± 9.2 abc*	165 ± 14.5 e††
Zeezand	18 ± 5.3 ab*	17 ± 5.7 bcd*	57 ± 6.4 bc†	60 ± 23.3 abc*	40 ± 12.9 bcde*	124 ± 37 bc†	54 ± 6.3 bcde*	79 ± 24.2 bcdef*	204 ± 37.7 f†
Zand van Lustin	34 ± 5.6 b*	24 ± 3.5 cd*	69 ± 8 bc†	99 ± 39.3 c*	57 ± 8.9 de*	173 ± 18.2 c*	90 ± 12.7 de*	119 ± 4.7 def*	228 ± 27.5 f†
Kalksteen 0/2	13 ± 5.1 a*	14 ± 5.1 abc*	49 ± 12.8 bc†	89 ± 36.9 bc*†	83 ± 15.9 e*	176 ± 58.1 c†	100 ± 16.8 e*	84 ± 29.1 bcdef*	198 ± 26 e††
Kalksteen 0/6.3	13 ± 6.1 a*	6 ± 3 ab*	52 ± 20.4 bc†	50 ± 23.3 abc*	36 ± 13.8 abcd*	66 ± 32 abc*	54 ± 20.3 bcde*	46 ± 24.7 abcd*	133 ± 38.4 bcdef†
Kalksteen 2/6.3	8 ± 0.7 a*	6 ± 2 ab*	48 ± 14.4 bc†	16 ± 7.2 ab*	33 ± 11.1 abcd*†	81 ± 5.6 abc†	49 ± 9.4 abcd*	66 ± 22.5 abcd*	147 ± 12 def†
Porfier 2/6.3	7 ± 1.8 a*	10 ± 2.5 abc*	73 ± 16.2 c†	41 ± 13.1 abc*	47 ± 3 cde*	140 ± 11.4 bc†	72 ± 9.1 cde*	149 ± 24.7 f†	264 ± 25.6 f†
Klassieke gebonden materialen									
Flowpoint®	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	1 ± 1.2 a	1 ± 0.6 a	0 ± 0 a
Zoutaangerijkte materialen									
Dansand®	0 ± 0 a	1 ± 0.3 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	1 ± 1.3 a	3 ± 2 a	1 ± 0.7 a
No Weed – Block paving sand®	0 ± 0 a	0 ± 0.3 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	1 ± 1.3 a	1 ± 0.8 a	0 ± 0.1 a
Biozand®	13 ± 6.1 a	13 ± 3.7 abcd	35 ± 13.8 abc	17 ± 9.1 ab*	30 ± 8 abcd*	142 ± 41.5 c†	48 ± 18.1 abcd	90 ± 3.1 cdef	135 ± 46.4 cdef
Harsgebonden materialen									
Jointex® Easy Joint (kleur: basalt)	1 ± 0.4 a	1 ± 0.3 a	1 ± 1 a	1 ± 1 a*	5 ± 1.1 ab†	1 ± 0.6 a*	2 ± 0.5 a*	61 ± 3.7 abcd†	30 ± 4.3 abcd†
M-Pflasterfugenmörtel®	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0.2 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0.4 a
Streetprotexion® III	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	2 ± 1 ab	0 ± 0 a	5 ± 2.7 ab	27 ± 11.6 abc	3 ± 1.9 a
Streetprotexion® I	1 ± 0.5 a*	7 ± 1.7 a†	3 ± 0.9 a†	0 ± 0 a	8 ± 4.6 ab	1 ± 0.6 a	8 ± 4 ab*	63 ± 17.7 abcde†	18 ± 8.8 abc*
Joint sealers									
Seal-all® joint	0 ± 0.1 a	0 ± 0.2 a	1 ± 1 a	0 ± 0.1 a*	5 ± 2.3 ab*	0 ± 0.4 a*	11 ± 3.3 ab*	13 ± 7.1 ab*	7 ± 2.9 a*
Polymeerzanden									
Techniseal® DR+	1 ± 0.3 a	3 ± 1.2 ab	2 ± 0.9 a	0 ± 0.3 a*	4 ± 1.2 ab†	1 ± 0.5 a*	2 ± 1.5 a*	21 ± 13.8 abc*	9 ± 2.5 ab*
Dansand Hard®	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0.4 a	1 ± 1.2 a	2 ± 2 a
Eco Fugensand® (kleur: beige)	0 ± 0.1 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
Eco Fugensand® (kleur: basalt)	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
Experimentele materialen									
IJzerslakken	0 ± 0.2 a*	7 ± 1.6 ab†	3 ± 1.4 a*	0 ± 0 a*	51 ± 5.6 cde†	29 ± 8.7 ab†	26 ± 10.8 abc*	86 ± 15.4 bcdef†	75 ± 8.5 abcde†
25 % experimenteel zand + 75 % wit kwartszand	17 ± 0.6 ab*	34 ± 4.8 d†	62 ± 10.4 bc†	50 ± 6.4 abc*	82 ± 7.5 e*	156 ± 18.6 c†	103 ± 6.9 e*	137 ± 4 e††	294 ± 21.6 f†

Significante verschillen werden gezocht tussen de vervuilingsgraden voor elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling enerzijds en tussen de voegvullingen voor elke factorcombinatie plantensoort x vervuilingsgraad anderzijds. Data met hetzelfde teken binnen elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling (horizontale vergelijking) zijn niet significant verschillend bij $P = 0.05$. Indien er geen tekens werden toegekend, zijn er geen significante verschillen tussen vervuilingsgraden. Data met dezelfde letter binnen elke combinatie plantensoort x vervuilingsgraad (verticale vergelijking) zijn niet significant verschillend bij $P = 0.05$. Deze statistische verwerking gebeurde met ANOVA indien mogelijk, anders werd een pairwise t-test met Bonferroni correctie gebruikt..

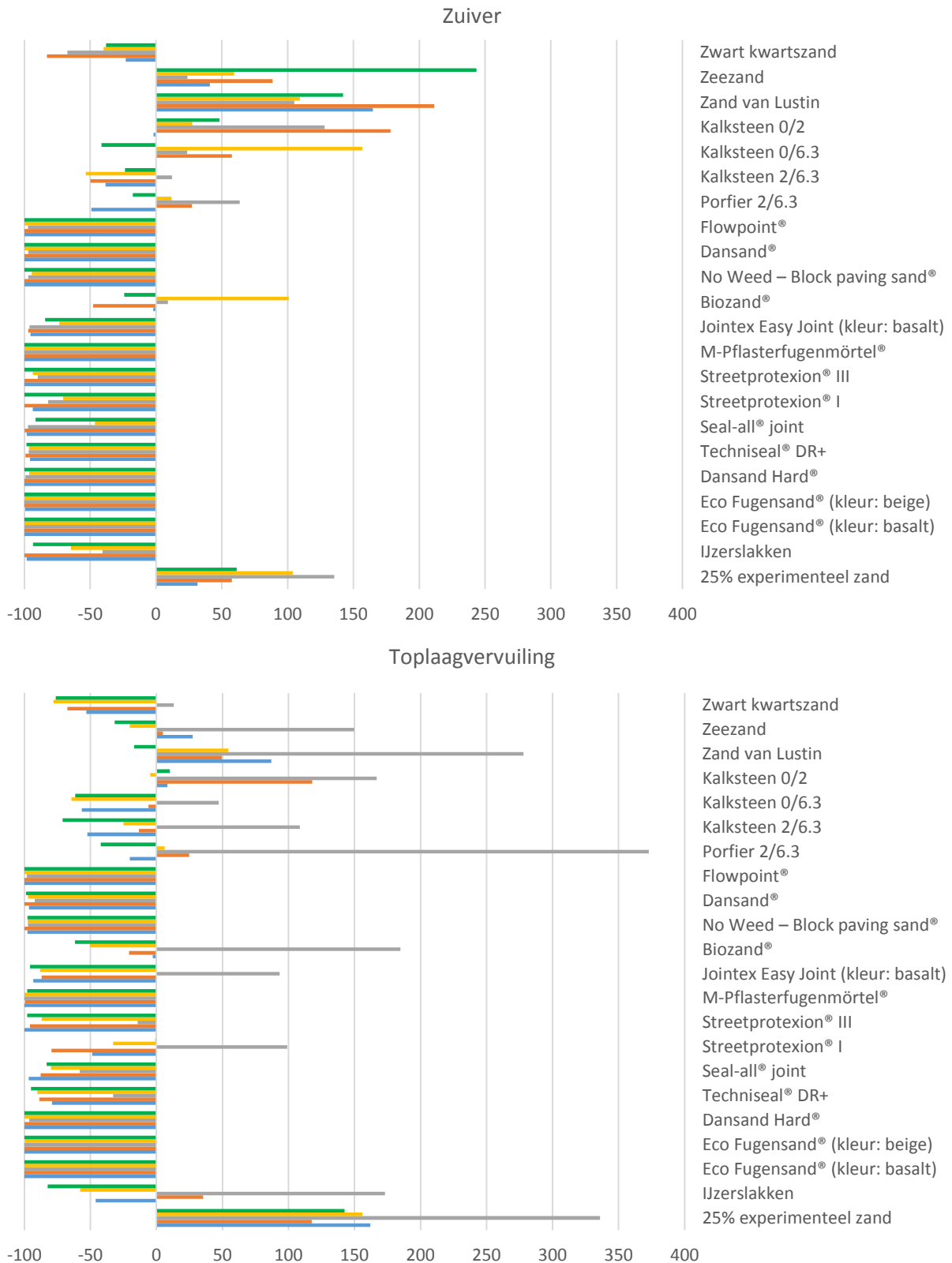
4.3 Experiment 3

Vervolg Tabel 20: Gemiddelde droge biomassa (mg pot⁻¹) ± standaardfout van vijf plantensoorten in functie van voegvulling en vervuilingsgraad, 62 dagen na inzaai.

Voegvulling	Straatgras			Grote weegbree		
	Zuiver	Toplaag-vervuiling	Uniforme vervuiling	Zuiver	Toplaag-vervuiling	Uniforme vervuiling
Klassieke ongebonden materialen						
Wit kwartszand	10 ± 3.6 abcd*	12 ± 5.7 ab*†	31 ± 12.9 ab†	18 ± 7.3 ab*	16 ± 6.4 ab*	151 ± 67.1 ab†
Zwart kwartszand	6 ± 2 abc*	3 ± 0.7 ab*	23 ± 6.9 a†	11 ± 8.7 ab*	4 ± 1.8 a*	98 ± 21.2 ab†
Zeezand	15 ± 3.5 abcd*	9 ± 4 ab*	48 ± 10.3 abc†	63 ± 17.1 c*	11 ± 7 a*	208 ± 28.3 bc†
Zand van Lustin	20 ± 3.6 cd*	18 ± 2.6 bc*	91 ± 25.4 bc†	44 ± 9.1 bc*	14 ± 11.3 a*	135 ± 25.8 ab†
Kalksteen 0/2	12 ± 3.7 abcd*	11 ± 4.3 ab*	80 ± 15.3 bcd†	27 ± 18 ab*†	18 ± 8.6 ab*	111 ± 41.4 ab†
Kalksteen 0/6.3	25 ± 6.9 d*	4 ± 2.1 ab*	96 ± 7.4 cd†	11 ± 6.5 ab*	6 ± 4.6 a*†	132 ± 53.5 ab†
Kalksteen 2/6.3	5 ± 1.3 abc*	9 ± 3.6 ab*	86 ± 17.3 cd†	14 ± 2.7 ab*	5 ± 4 a*	186 ± 35.3 bc†
Porfier 2/6.3	11 ± 3 abcd*	13 ± 2.6 ab*	100 ± 13.7 abc†	15 ± 8.5 ab*	9 ± 6.3 a*	318 ± 63.8 c†
Klassieke gebonden materialen						
Flowpoint®	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
Zoutaangerijkte materialen						
Dansand®	0 ± 0 a	0 ± 0.3 a	1 ± 0.7 a	0 ± 0 a	0 ± 0.2 a	0 ± 0 a
No Weed – Block paving sand®	1 ± 0.5 a	0 ± 0.3 a	1 ± 0.5 a	0 ± 0 a	0 ± 0.4 a	0 ± 0 a
Biozand®	19 ± 7.9 bcd†	6 ± 1 ab*	25 ± 6 a†	14 ± 5.4 ab*	6 ± 3.1 a*	80 ± 22.1 ab†
Harsgebonden materialen						
Jointex® Easy Joint (kleur: basalt)	3 ± 1 a	1 ± 0.5 a	5 ± 1.2 a	3 ± 1.4 a*	1 ± 0.3 a*	9 ± 1.7 a†
M-Pflasterfugenmörtel®	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0.4 a	0 ± 0 a	0 ± 0.4 a	1 ± 1.4 a
Streetprotexion® III	1 ± 0.6 a	2 ± 0.9 a	3 ± 2.6 a	0 ± 0 a	0 ± 0.3 a	3 ± 2.4 a
Streetprotexion® I	3 ± 1.5 a*	8 ± 1.5 ab†	3 ± 1.3 a*	0 ± 0 a*	16 ± 1.9 ab†	1 ± 0.5 a*
Joint sealers						
Seal-all® joint	5 ± 2.3 abc†	2 ± 0.9 ab*†	2 ± 0.7 a*	2 ± 0.9 a	3 ± 1.6 a	2 ± 1.3 a
Polymeerzanden						
Techniseal® DR+	0 ± 0.3 a	1 ± 0.7 a	1 ± 0.5 a	0 ± 0.2 a	1 ± 0.5 a	1 ± 0.8 a
Dansand Hard®	0 ± 0.3 a	0 ± 0 a	1 ± 1.1 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0.3 a
Eco Fugensand® (kleur: beige)	0 ± 0 a	0 ± 0.1 a	0 ± 0.3 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
Eco Fugensand® (kleur: basalt)	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a	0 ± 0 a
Experimentele materialen						
Ijzerslakken	3 ± 1.3 ab	5 ± 1.8 ab	5 ± 0.9 a	1 ± 0.7 a	3 ± 1.7 a	3 ± 2.3 a
25 % experimenteel zand +	19 ± 4.3 bcd*	30 ± 9.7 c*	118 ± 15.7 d†	29 ± 2.1 abc*	39 ± 13 b*	304 ± 34.2 c†
75 % wit kwartszand						

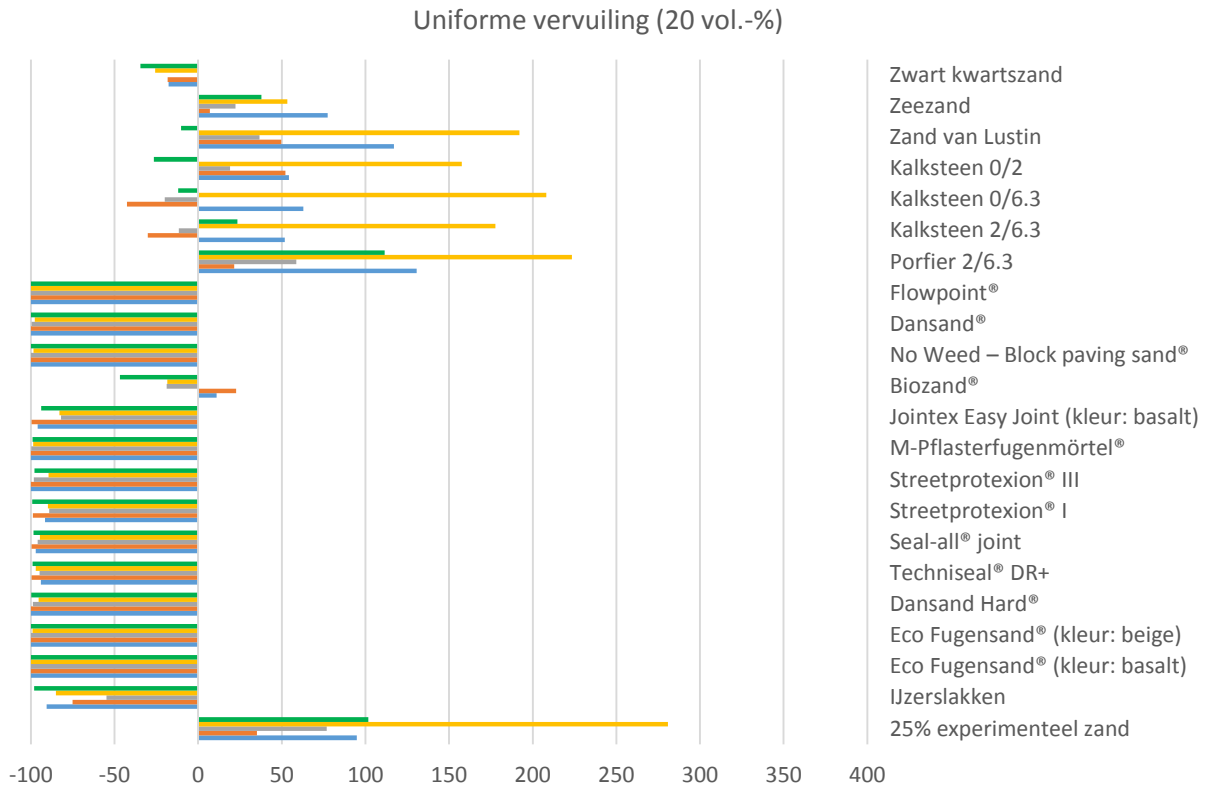
Significante verschillen werden gezocht tussen de vervuilingsgraden voor elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling enerzijds en tussen de voegvullingen voor elke factorcombinatie plantensoort x vervuilingsgraad anderzijds. Data met hetzelfde teken binnen elke factorcombinatie plantensoort x voegvulling (horizontale vergelijking) zijn niet significant verschillend bij $P = 0.05$. Indien er geen tekens werden toegekend, zijn er geen significante verschillen tussen vervuilingsgraden. Data met dezelfde letter binnen elke combinatie plantensoort x vervuilingsgraad (verticale vergelijking) zijn niet significant verschillend bij $P = 0.05$. Deze statistische verwerking gebeurde met ANOVA indien mogelijk, anders werd een pairwise t-test met Bonferroni correctie gebruikt.

4.3 Experiment 3



Figuur 16: Verschillen in relatieve groeirespons per plantensoort naargelang de voegvulling en de vervuilingsgraad. De groeirespons werd uitgedrukt als procentuele verandering in droge biomassa ten opzichte van wit kwartszand. Bij -100 % komt er dus geen onkruidgroei voor, terwijl positieve waarden duiden op meer onkruidgroei dan in wit kwartszand. Groen: grote weegbree, Geel: straatgras, Grijs: Engels raaigras, Oranje: paardenbloem, Blauw: gewone hoornbloem.

4.3 Experiment 3



Vervolg Figuur 16: Verschillen in relatieve groeirespons per plantensoort naargelang de voegvulling en de vervuilingsgraad. De groeirespons werd uitgedrukt als procentuele verandering in droge biomassa ten opzichte van wit kwartszand. Bij -100 % komt er dus geen onkruidgroei voor, terwijl positieve waarden duiden op meer onkruidgroei dan in wit kwartszand. Groen: grote weegbree, Geel: straatgras, Grijs: Engels raaigras, Oranje: paardenbloem, Blauw: gewone hoornbloem.

4.3 Experiment 3

Tabel 21: Opkomst (uitgedrukt als procentuele opkomst van het aantal zaden per potje) van 5 plantensoorten in functie van voegvulling en vervuilingsgraad, 4 en 8 weken na inzaai (WNZ). De waarden zijn het gemiddelde $\pm$ de standaardfout van de 4 herhalingen.

Voegvulling	Gewone hoornbloem						Paardenbloem					
	Zuiver		Toplaagvervuiling		Uniforme vervuiling		Zuiver		Toplaagvervuiling		Uniforme vervuiling	
	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ
Klassieke ongebonden materialen												
Wit kwartszand	57 $\pm$ 19.1	59 $\pm$ 20.4	58 $\pm$ 20	53 $\pm$ 18.9	55 $\pm$ 19	58 $\pm$ 18.2	50 $\pm$ 17.2	46 $\pm$ 15.8	51 $\pm$ 17.5	52 $\pm$ 18	50 $\pm$ 14.7	47 $\pm$ 13.1
Zwart kwartszand	28 $\pm$ 18.4	27 $\pm$ 18.1	36 $\pm$ 9.4	34 $\pm$ 12.9	82 $\pm$ 4.8	77 $\pm$ 5.7	6 $\pm$ 6	8 $\pm$ 5.7	28 $\pm$ 11.7	28 $\pm$ 10.7	60 $\pm$ 2.3	58 $\pm$ 2.6
Zeezand	51 $\pm$ 14.7	50 $\pm$ 18.3	49 $\pm$ 13.8	49 $\pm$ 17.6	75 $\pm$ 4.7	70 $\pm$ 6.2	40 $\pm$ 16.7	37 $\pm$ 13.4	54 $\pm$ 16.9	50 $\pm$ 15.7	53 $\pm$ 11.1	54 $\pm$ 11.6
Zand van Lustin	82 $\pm$ 5	82 $\pm$ 5.8	58 $\pm$ 10.6	59 $\pm$ 8.1	83 $\pm$ 5.3	79 $\pm$ 4.1	73 $\pm$ 2.5	74 $\pm$ 2	81 $\pm$ 2.5	80 $\pm$ 3.3	68 $\pm$ 2.8	69 $\pm$ 3
Kalksteen 0/2	34 $\pm$ 9	35 $\pm$ 10.5	66 $\pm$ 5.3	47 $\pm$ 16.4	67 $\pm$ 13.7	56 $\pm$ 12.1	72 $\pm$ 9.7	70 $\pm$ 9.9	81 $\pm$ 6	77 $\pm$ 7.5	78 $\pm$ 7.4	72 $\pm$ 8.5
Kalksteen 0/6.3	46 $\pm$ 19.1	43 $\pm$ 19.4	30 $\pm$ 14.1	30 $\pm$ 13.2	63 $\pm$ 19.8	63 $\pm$ 20.6	53 $\pm$ 14.5	48 $\pm$ 19.5	63 $\pm$ 9.4	57 $\pm$ 19.6	46 $\pm$ 16.9	43 $\pm$ 15.9
Kalksteen 2/6.3	37 $\pm$ 10	44 $\pm$ 10.2	† 15 $\pm$ 5.7	21 $\pm$ 7.5	* 76 $\pm$ 5.7	78 $\pm$ 5.3	26 $\pm$ 11	23 $\pm$ 9.6	53 $\pm$ 17.8	48 $\pm$ 16.7	63 $\pm$ 7.7	61 $\pm$ 5.3
Porfier 2/6.3	25 $\pm$ 5.5	33 $\pm$ 5.3	26 $\pm$ 4.8	29 $\pm$ 4.7	73 $\pm$ 2.5	73 $\pm$ 1.9	45 $\pm$ 3.8	43 $\pm$ 3.4	58 $\pm$ 11.1	55 $\pm$ 10	75 $\pm$ 3	68 $\pm$ 4
Klassieke gebonden materialen												
Flowpoint®	0 $\pm$ 0	2 $\pm$ 2	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	3 $\pm$ 1.9	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0
Zoutaangerijkte materialen												
Dansand®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
No Weed – Block paving sand®	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	2 $\pm$ 2	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Biozand®	72 $\pm$ 9.4	63 $\pm$ 11.6	* 85 $\pm$ 8.4	83 $\pm$ 7.9	79 $\pm$ 7.2	69 $\pm$ 6.6	18 $\pm$ 9.3	18 $\pm$ 9.3	52 $\pm$ 9.1	55 $\pm$ 8.1	58 $\pm$ 7.4	66 $\pm$ 10.5
Harsgebonden materialen												
Jointex® Easy Joint (kleur: basalt)	0 $\pm$ 0	3 $\pm$ 1.9	0 $\pm$ 0	2 $\pm$ 1.2	4 $\pm$ 2.8	8 $\pm$ 6.7	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	16 $\pm$ 4.9	16 $\pm$ 4.9	2 $\pm$ 2	2 $\pm$ 2
M-Pflasterfugenmörtel®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Streetprotexion® III	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	4 $\pm$ 2.8	4 $\pm$ 2.8	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Streetprotexion® I	15 $\pm$ 8.7	22 $\pm$ 13.1	24 $\pm$ 3.7	36 $\pm$ 4.6	31 $\pm$ 10.6	30 $\pm$ 15.9	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	29 $\pm$ 13.4	27 $\pm$ 10	7 $\pm$ 3	2 $\pm$ 2
Joint sealers												
Seal-all® joint	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	4 $\pm$ 1.6	7 $\pm$ 3	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	13 $\pm$ 6.6	14 $\pm$ 7.4	1 $\pm$ 1	3 $\pm$ 1.9
Polymeerzanden												
Techniseal® DR+	8 $\pm$ 8	7 $\pm$ 4.7	36 $\pm$ 4.3	40 $\pm$ 9.1	8 $\pm$ 4.3	16 $\pm$ 8.5	0 $\pm$ 0	4 $\pm$ 2.8	15 $\pm$ 8.7	10 $\pm$ 2	5 $\pm$ 3.8	12 $\pm$ 12
Dansand Hard®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0
Eco Fugensand® (kleur: beige)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Eco Fugensand® (kleur: basalt)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Experimentele materialen												
IJzerslakken	1 $\pm$ 1	1 $\pm$ 1	63 $\pm$ 13.4	58 $\pm$ 10.9	19 $\pm$ 6.2	19 $\pm$ 5	6 $\pm$ 4.8	1 $\pm$ 1	70 $\pm$ 4.8	71 $\pm$ 8.2	41 $\pm$ 9	43 $\pm$ 10
25 % experimenteel zand + 75 % wit kwartszand	83 $\pm$ 3.4	83 $\pm$ 4.4	84 $\pm$ 1.6	83 $\pm$ 1.9	85 $\pm$ 7	84 $\pm$ 7.1	74 $\pm$ 3.8	75 $\pm$ 4.1	69 $\pm$ 3.4	73 $\pm$ 4.1	61 $\pm$ 7.2	59 $\pm$ 4.1

Statistische verwerking gebeurde met een paired t-test binnen elke factorcombinatie van plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad. Er werd getest op significante verschillen tussen telling 4 en 8 weken na inzaai; *: $P < 0.05$ en †: $P < 0.01$. Data zonder asterisk of obelisk zijn niet significant verschillend.

4.3 Experiment 3

Vervolg Tabel 21: Opkomst (uitgedrukt als procentuele opkomst van het aantal zaden per potje) van 5 plantensoorten in functie van voegvulling en vervuilingsgraad, 4 en 8 weken na inzaai (WNZ). De waarden zijn het gemiddelde $\pm$ de standaardfout van de 4 herhalingen.

Voegvulling	Engels Raagrass						Straatgrass							
	Zuiver		Toplaagvervuiling		Uniforme vervuiling		Zuiver		Toplaagvervuiling		Uniforme vervuiling			
	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ		
Klassieke ongebonden materialen														
Wit kwartszand	72 ± 11.9	63 ± 21.1	51 ± 19.1	56 ± 19.8	68 ± 17.5	63 ± 17.7	59 ± 18.5	60 ± 20.5	30 ± 14.7	30 ± 13.2	45 ± 16.4	45 ± 15.2		
Zwart kwartszand	25 ± 19.8	25 ± 17.3	41 ± 15.2	39 ± 14.6	71 ± 12.5	73 ± 11.7	41 ± 14.8	45 ± 15.6	21 ± 9	22 ± 8.9	61 ± 5	64 ± 7.1		
Zeezand	79 ± 6.8	81 ± 6.2	86 ± 7.7	78 ± 13.3	89 ± 1.9	81 ± 2.5	*	67 ± 14.2	71 ± 5.7	16 ± 7.3	19 ± 8.2	38 ± 14.3	47 ± 17.6	
Zand van Lustin	89 ± 3	91 ± 1	92 ± 4.3	90 ± 3.5	92 ± 3.3	92 ± 5.4	67 ± 6	71 ± 7.2	24 ± 8.6	25 ± 8.7	57 ± 5	54 ± 4.8		
Kalksteen 0/2	88 ± 4.9	86 ± 5.3	87 ± 6.4	62 ± 20.9	91 ± 3	90 ± 2.6	50 ± 6	51 ± 6.8	32 ± 8.2	22 ± 10.9	69 ± 7.5	61 ± 5.5		
Kalksteen 0/6.3	45 ± 18.6	49 ± 20	87 ± 1	59 ± 20.7	63 ± 16.3	62 ± 15	80 ± 7.7	74 ± 3.8	13 ± 4.1	14 ± 6.2	62 ± 7.4	62 ± 6.6		
Kalksteen 2/6.3	54 ± 10.4	61 ± 7.2	63 ± 21.1	65 ± 22.1	72 ± 11.9	69 ± 11.5	14 ± 5.8	22 ± 3.8	*	17 ± 7	19 ± 7.4	69 ± 10	58 ± 8.1	
Porfier 2/6.3	72 ± 12	77 ± 10.2	92 ± 2.8	92 ± 3.3	90 ± 3.5	85 ± 1.9	36 ± 10.7	50 ± 9.3	†	20 ± 2.3	25 ± 3.4	74 ± 5.3	68 ± 7.1	
Klassieke gebonden materialen														
Flowpoint®	10 ± 6	4 ± 2.3	49 ± 17	28 ± 20.2	8 ± 6.7	2 ± 2	19 ± 19	18 ± 18	22 ± 8.2	25 ± 12.9	16 ± 11.3	0 ± 0		
Zoutaangerijkte materialen														
Dansand®	1 ± 1	1 ± 1	5 ± 3	5 ± 2.5	1 ± 1	1 ± 1	0 ± 0	0 ± 0	2 ± 2	0 ± 0	8 ± 8	0 ± 0		
No Weed – Block paving sand®	2 ± 2	1 ± 1	11 ± 9.7	1 ± 1	2 ± 2	1 ± 1	7 ± 7	0 ± 0	3 ± 3	0 ± 0	5 ± 5	0 ± 0		
Biozand®	58 ± 22	52 ± 18.8	93 ± 1.9	93 ± 1	94 ± 2.6	93 ± 1.9	68 ± 5.9	76 ± 2.8	20 ± 6.3	21 ± 7.2	48 ± 5.7	49 ± 6.2		
Harsgebonden materialen														
Jointex® Easy Joint (kleur: basalt)	17 ± 8.4	24 ± 6.9	85 ± 6.2	83 ± 7.2	46 ± 6.2	52 ± 2.8	27 ± 12.2	33 ± 14	7 ± 1.9	14 ± 3.5	46 ± 6.6	64 ± 10.2	*	
M-Pflasterfugenmörtel®	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	1 ± 1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	5 ± 5		
Streetprotexion® III	15 ± 10.4	17 ± 9.3	45 ± 17.2	51 ± 17.9	3 ± 3	4 ± 2.8	2 ± 2	5 ± 5	5 ± 5	29 ± 10.9	*	9 ± 9	16 ± 13.5	
Streetprotexion® I	36 ± 14	25 ± 11.5	*	34 ± 9.6	36 ± 10.7	35 ± 11.1	26 ± 10.1	44 ± 10.2	29 ± 13.8	25 ± 1.9	32 ± 1.6	38 ± 10.9	38 ± 10.9	
Joint sealers														
Seal-all® joint	28 ± 6.3	31 ± 7.7	19 ± 8.9	19 ± 7.9	10 ± 6	19 ± 7.2	11 ± 8.5	37 ± 10	*	12 ± 5.2	18 ± 7.4	4 ± 2.3	19 ± 6.4	
Polymeerzanden														
Techniseal® DR+	8 ± 4.9	9 ± 6.6	59 ± 13.7	61 ± 15.9	25 ± 9.6	39 ± 10.6	4 ± 4	11 ± 5.5	5 ± 5	20 ± 3.3	*	4 ± 2.8	9 ± 6.6	
Dansand Hard®	16 ± 11.3	1 ± 1	31 ± 18.6	2 ± 2	9 ± 7.7	6 ± 6	2 ± 2	2 ± 2	2 ± 2	0 ± 0	8 ± 4.9	16 ± 12.3		
Eco Fugensand® (kleur: beige)	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		
Eco Fugensand® (kleur: basalt)	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0		
Experimentele materialen														
IJzerslakken	50 ± 8.1	43 ± 9	*	86 ± 5	86 ± 5.3	67 ± 6.4	65 ± 5.7	26 ± 4.8	26 ± 6	22 ± 6.2	24 ± 5.4	31 ± 9.1	28 ± 9.5	*
25 % experimenteel zand + 75 % wit kwartszand	93 ± 3.4	95 ± 3		87 ± 4.4	86 ± 4.2	72 ± 7.5	74 ± 7.4	77 ± 3.4	76 ± 2.3	16 ± 2.8	16 ± 1.6	65 ± 8.1	55 ± 8.9	

Statistische verwerking gebeurde met een paired t-test binnen elke factorcombinatie van plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad. Er werd getest op significante verschillen tussen telling 4 en 8 weken na inzaai; *: $P < 0.05$ en †: $P < 0.01$. Data zonder asterisk of obelisk zijn niet significant verschillend.

4.3 Experiment 3

Vervolg (bis) Tabel 21: Opkomst (uitgedrukt als procentuele opkomst van het aantal zaden per potje) van 5 plantensoorten in functie van voegvulling en vervuilingsgraad, 4 en 8 weken na inzaai (WNZ). De waarden zijn het gemiddelde $\pm$ de standaardfout van de 4 herhalingen.

Voegvulling	Grote weegbree					
	Zuiver		Toplaagvervuiling		Uniforme vervuiling	
	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ	4 WNZ	8 WNZ
Klassieke ongebonden materialen						
Wit kwartszand	63 $\pm$ 21.7	56 $\pm$ 19.3	29 $\pm$ 12.7	28 $\pm$ 12.5	57 $\pm$ 18.9	56 $\pm$ 18
Zwart kwartszand	30 $\pm$ 11.8	22 $\pm$ 14.3	8 $\pm$ 2.8	8 $\pm$ 2.8	69 $\pm$ 12.8	70 $\pm$ 8.4
Zeezand	67 $\pm$ 11.1	70 $\pm$ 11.5	11 $\pm$ 4.4	11 $\pm$ 4.4	89 $\pm$ 5	90 $\pm$ 4.2
Zand van Lustin	70 $\pm$ 9.6	68 $\pm$ 9.5	12 $\pm$ 10.7	12 $\pm$ 10.7	75 $\pm$ 6	79 $\pm$ 8.1
Kalksteen 0/2	44 $\pm$ 11	45 $\pm$ 13.5	21 $\pm$ 5	20 $\pm$ 7.1	68 $\pm$ 9.1	50 $\pm$ 17.5
Kalksteen 0/6.3	34 $\pm$ 18.6	27 $\pm$ 18.4	7 $\pm$ 5.7	7 $\pm$ 4.4	57 $\pm$ 19.9	59 $\pm$ 20.5
Kalksteen 2/6.3	40 $\pm$ 8.6	36 $\pm$ 8.5	9 $\pm$ 7.7	9 $\pm$ 7.7	73 $\pm$ 7.7	77 $\pm$ 7.7
Porfier 2/6.3	35 $\pm$ 11.1	34 $\pm$ 11.8	10 $\pm$ 4.8	8 $\pm$ 4.6	82 $\pm$ 4.8	83 $\pm$ 6.4
Klassieke gebonden materialen						
Flowpoint®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	4 $\pm$ 2.8	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Zoutaangerijkte materialen						
Dansand®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	1 $\pm$ 1	0 $\pm$ 0	5 $\pm$ 5
No Weed – Block paving sand®	0 $\pm$ 0	8 $\pm$ 8	0 $\pm$ 0	2 $\pm$ 1.2	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Biozand®	67 $\pm$ 5.5	60 $\pm$ 7.8	13 $\pm$ 4.4	14 $\pm$ 4.8	79 $\pm$ 7	79 $\pm$ 6.8
Harsgebonden materialen						
Jointex® Easy Joint (kleur: basalt)	16 $\pm$ 4.3	15 $\pm$ 5	3 $\pm$ 1.9	5 $\pm$ 1.9	42 $\pm$ 9.9	43 $\pm$ 11.8
M-Pflasterfugenmörtel®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	2 $\pm$ 2	0 $\pm$ 0	7 $\pm$ 7
Streetprotexion® III	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	4 $\pm$ 2.8	3 $\pm$ 1.9	8 $\pm$ 6.7	14 $\pm$ 10.4
Streetprotexion® I	11 $\pm$ 6.2	1 $\pm$ 1	47 $\pm$ 8.5	47 $\pm$ 10.2	10 $\pm$ 3.8	9 $\pm$ 5.3
Joint sealers						
Seal-all® joint	14 $\pm$ 8.2	11 $\pm$ 6.8	8 $\pm$ 8	10 $\pm$ 7.6	20 $\pm$ 12.8	15 $\pm$ 9
Polymeerzanden						
Techniseal® DR+	0 $\pm$ 0	6 $\pm$ 4.8	2 $\pm$ 2	4 $\pm$ 2.8	6 $\pm$ 2.6	9 $\pm$ 3 *
Dansand Hard®	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	3 $\pm$ 3	2 $\pm$ 2
Eco Fugensand® (kleur: beige)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Eco Fugensand® (kleur: basalt)	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0	0 $\pm$ 0
Experimentele materialen						
IJzerslakken	7 $\pm$ 5.7	7 $\pm$ 5.7	15 $\pm$ 7.7	14 $\pm$ 6.2	17 $\pm$ 5.3	5 $\pm$ 2.5 *
25 % experimenteel zand + 75 % wit kwartszand	87 $\pm$ 4.4	79 $\pm$ 5.3	19 $\pm$ 7.2	19 $\pm$ 5.7	86 $\pm$ 3.8	86 $\pm$ 5.8

Statistische verwerking gebeurde met een paired t-test binnen elke factorcombinatie van plantensoort x voegvulling x vervuilingsgraad. Er werd getest op significante verschillen tussen telling 4 en 8 weken na inzaai; *: $P < 0.05$ en †: $P < 0.01$. Data zonder asterisk of obelisk zijn niet significant verschillend.

4.3.2. Discussie

Bij alle onderstaande bevindingen moet opgemerkt worden dat veel materialen – en zeker de klassieke ongebonden materialen – werden getest onder omstandigheden die grondig verschillen van die in *in situ* verhardingen. In experiment 3 werden ze nl. getest bij hoge voegpercentages (volledig potoppervlak van 7 cm op 7 cm) terwijl het voegpercentage in *in situ* elementverhardingen doorgaans erg klein is (rond de 6 % voor bestrating met klassieke betonstraatstenen met voegbreedte van 3 mm). Wellicht zullen de verschillen in onkruidwerend vermogen meer uitgesproken zijn indien ze getest zouden worden in voegen van een *in situ* bestrating, dit omwille van de beperktere beschikbaarheid van de plantengroei-bepalende factoren ruimte, nutriënten en vocht. Daarnaast zullen verschillen in onkruidwerend vermogen wellicht meer uitgesproken zijn bij een lange screeningsduur dan bij een korte screeningsduur (zoals in experiment 3). De onderlinge rangschikking qua onkruidwerend vermogen zal waarschijnlijk niet veranderen, mocht de test uitgevoerd zijn in *in situ* voegen aangezien de intrinsieke eigenschappen van het voegvullingsmateriaal wellicht belangrijker zijn dan het ter beschikking staand voegpercentage. Het kan evenwel niet uitgesloten worden dat bepaalde voegvullingsmaterialen die totaal ongeschikt zijn voor toepassing in brede voegen of milieus met hoge voegpercentages (zoals bijvoorbeeld mozaïekbestratingen) – dus bij “oneigenlijk” gebruik – hun onkruidwerend vermogen zouden verliezen.

Invloed van de plantensoort op het onkruidwerend vermogen van voegvullingen

Naargelang de eigenschappen van plantensoorten, zijn (categorieën van) voegvullingen beter of minder goed in staat de groei te belemmeren.

Engels raaigras en straatgras zijn eerder droogtegevoelige plantensoorten (Vargas & Turgeon, 2003; Jupp & Newman, 1987). Bij deze plantensoorten verwacht men minder groei in substraten die minder plantbeschikbaar water bevatten, zeker onder droge omstandigheden. Vooral grofkorrelige voegvullingsmaterialen bevatten weinig plantbeschikbaar vocht aangezien deze weinig korrels < 50 µm bevatten in tegenstelling tot fijnkorrelige voegvullingsmaterialen (Boonen *et al.*, 2013). Experiment 3 lijkt het effect van de granulometrie op onkruidwerend vermogen te bevestigen: zowel Engels raaigras als straatgras produceren minder biomassa in zuivere kalksteen 2/6.3 dan in zuivere kalksteen met korrelgrootte 0/2 en 0/6.3, en dit zelfs onder een neerslagrijk regime van 2.97 L m⁻² dag⁻¹. Zodra deze kalksteengebaseerde voegvullingsmaterialen organisch vervuild geraken, speelt de granulometrie nog nauwelijks en is hun onkruidwerend vermogen ten aanzien van Engels raaigras en straatgras amper verschillend. Organisch materiaal houdt immers veel plantbeschikbaar vocht vast (De Cauwer *et al.*, 2014). Ook De Cauwer *et al.* (2013a) kwamen reeds tot deze bevindingen.

Paardenbloem is een erg zoutgevoelige plant. Bij deze plantensoort in het bijzonder verwacht men weinig biomassa-accumulatie in zoutaangerijkte voegvullingsmaterialen, hetgeen bevestigd wordt in deze studie. Zelfs het anders zwak presterende zoutaangerijkt materiaal Biozand® kan paardenbloem beter remmen in zijn groei dan de andere plantensoorten. Ook het experimenteel zand van Sibelco® presteert relatief gezien sterker ten opzichte van paardenbloem dan ten opzichte van de andere plantensoorten. Dit suggereert dat het experimenteel zand vermoedelijk tot op zekere hoogte aangerijkt werd met zouten, maar vermoedelijk niet even sterk als Dansand®, No Weed - Block paving sand® en Biozand® gezien zijn zwakker onkruidwerend vermogen. Dat Biozand® minder onkruidwerend is dan andere zoutaangerijkte materialen zoals Dansand®, strookt met De Cauwer *et*

al. (2014); de zwakkere prestatie kan geweten worden aan de lagere zoutconcentratie (veel minder natrium, zie Tabel 7). Ook zeezand, dat rijker is aan zouten dan wit kwartszand, presteert tegenover paardenbloem onkruidwerender dan tegenover de andere plantensoorten (relatief t.o.v. wit kwartszand). Toch is het zelfs hier nog steeds minder onkruidwerend dan standaard wit kwartszand. De wisselende samenstelling van zeezand en wit kwartszand – die natuurlijke materialen zijn – kan aan de basis liggen van dit verschil. Ook moet opgemerkt worden dat wit kwartszand in dit experiment een erg grote onkruidwerendheid vertoont. Ter illustratie; experiment 2 werd in dezelfde serre, in dezelfde zomer, over eenzelfde periode (59 dagen tegenover 62 dagen) en in dezelfde potjes uitgevoerd. Zuiver wit kwartszand leverde in experiment 2 gemiddeld 133 mg paardenbloem en in experiment 3 slechts 32 mg paardenbloem. Hiervoor kan niet meteen een verklaring gevonden worden.

Verschillen in onkruidwerend vermogen tussen en binnen voegvullingscategorieën

Tussen categorieën kan maar moeilijk een vergelijking gemaakt worden voor het onkruidwerend vermogen omdat elke categorie te veel variatie vertoont tussen materialen. Bovendien is er zowel van vervuilingsgraad als plantensoort een sterke invloed op het onkruidwerend vermogen van deze individuele materialen. Doorgaans zijn de klassieke ongebonden materialen en het experimenteel zand het minst onkruidwerend, zowel qua biomassa-accumulatie als qua plantaantal. Dit wordt bevestigd door de resultaten van het onderzoek van De Cauwer *et al.* (2014). De ijzerslakken zien er echter veelbelovend uit; ten opzichte van wit kwartszand is het voor elke plantensoort in zuivere toestand minstens 41 % onkruidwerender. Experimenten van De Cauwer *et al.* (2014) toonden dit ook aan. Dat de klassieke ongebonden materialen in deze proef zo veel zwakker presteren dan veel innovatieve materialen moet evenwel toegelicht worden. Deze materialen werden immers getest in oppervlaktes die veel breder zijn dan de voegen waarvoor deze materialen – en bij uitbreiding ook verschillende innovatieve materialen – aangeraden worden. Onderzoeken van De Cauwer *et al.* (2013), Fagot *et al.* (2011) en Melander *et al.* (2009) wezen er reeds op dat klassieke ongebonden materialen zwakker presteren indien ze toegepast worden in voegen die breder zijn dan het toepassingsgebied van het materiaal.

Meestal presteren de innovatieve materialen dus beter dan de klassieke ongebonden materialen. Deze betere prestatie is te wijten aan verschillende zaken. De zoutaangerijkte materialen putten hun onkruidwerend vermogen uit hun erg hoog zoutgehalte (zie Tabel 7). De harsgebonden materialen zijn vermoedelijk onkruidwerend door een combinatie van goede waterdoorlatendheid, chemische samenstelling en verhard oppervlak. De joint sealers zijn onkruidwerend omdat ze zorgen voor een verhard oppervlak. De klassieke gebonden materialen verhinderen inworteling door een verhard en gesloten oppervlak. Polymeerzanden verhinderen eveneens inworteling maar bezitten doorgaans ook een hoge pH (zie Tabel 7) die nuttig is op het moment dat het materiaal plastisch wordt en bijgevolg toegankelijker wordt voor onkruiden.

Ook binnen elke categorie zijn er verschillen in onkruidwerend vermogen. Binnen de harsgebonden materialen presteren Jointex® Easy Joint (kleur: basalt) en StreetProtexion® I bijvoorbeeld zwakker dan de andere materialen en ook Techniseal® DR+ laat meer onkruidgroei toe dan de overige polymeerzanden. Op Biozand® na, zijn deze verschillen echter nooit significant voor innovatieve categorieën. Binnen de categorie van de klassieke ongebonden materialen varieert de biomassa sterk; voor bijvoorbeeld uniforme vervuiling is de biomassa straatgras in porfier 2/6.3 223 % hoger dan in wit kwartszand terwijl de biomassa paardenbloem in kalksteen 0/6.3 43 % lager ligt dan in wit kwartszand.

Verschillende factoren spelen hier doorgaans een rol zoals de korrelgrootte, pH, de chemische samenstelling, de waterpermeabiliteit en de tolerantie voor vervuiling.

Opmerkelijk binnen de categorie van klassieke ongebonden materialen is de zeer goede onkruidwerendheid van zwart kwartszand; in zuivere toestand is zwart kwartszand 23 % (gewone hoornbloem) tot 83 % (paardenbloem) onkruidwerender dan wit kwartszand. Dit is te wijten aan de hoge pH van dit materiaal (pH = 9.4, zie Tabel 7) en de vele ijzerrijke mineralen die in zwart kwartszand aanwezig zijn (Hursl & Niedermayr, 2003).

Ook voor Eco Fugensand® zijn er geen verschillen merkbaar tussen de twee kleurvarianten, waaruit geconcludeerd kan worden dat kleur geen significante rol speelt in het onkruidwerend vermogen van een voegvullingsmateriaal. Tussen Dansand® en No Weed - Block paving sand® – die van dezelfde fabrikant afkomstig zijn maar door verschillende bedrijven verdeeld worden – zijn slechts verwaarloosbaar kleine verschillen merkbaar, dus de samenstelling is vermoedelijk zeer gelijkaardig hoewel de prijs sterk verschilt.

Verschillen tussen vervuilingsgraden

Er is een sterke impact van de vervuiling en de wijze waarop die is aangebracht op de onkruidgroei. Zo is er in kalksteen 2/6.3 meer droge biomassa straatgras bij top laagvervuiling (+80 %) en bij uniforme vervuiling (+1 620 %) dan bij het zuivere materiaal. Ook grote weegbree vormt meer biomassa in kalksteen 2/6.3 bij uniforme vervuiling (+1 229 %), maar bij top laagvervuiling is er een daling merkbaar (-64 %). Vooral klassieke ongebonden materialen vertonen significante verschillen tussen de vervuilingsgraden, terwijl de klassieke gebonden materialen en de innovatieve materialen vaak geen significant verschillende biomassa-accumulatie vertonen bij vervuiling. Bovendien lijken deze significante verschillen eerder afhankelijk te zijn van het materiaal dan van de vervuilingvorm. Slechts een klein aantal significante verschillen werden aangetroffen tussen de zuivere materialen en de top laagvervuilde materialen. De reden hiervoor is vermoedelijk dat de top laag relatief snel uitdroogde in de serre en een korst vormde bovenop het materiaal waardoor groei bemoeilijkt werd.

De klassieke gebonden of innovatieve materialen vertonen – op het experimenteel zand, Biozand® en de ijzerslakken na – de meeste biomassa-accumulatie bij top laagvervuiling, terwijl de klassieke ongebonden materialen meer biomassa-accumulatie hebben bij uniforme vervuiling. De reden hiervoor ligt vermoedelijk bij de aard van de innovatieve materialen. Indien het innovatief materiaal verhard is, is de organische stof bij uniforme vervuiling niet toegankelijk voor de planten. Als de werking dan weer berust op hoge pH of fysiologische droogte – zoals voor de zoutaangerijkte materialen of de polymeerzanden – zijn deze effecten minder uitgesproken in de top laag. De klassieke ongebonden materialen vormen geen zo'n vijandige omgeving voor de plant, waardoor de biomassa-accumulatie in deze materialen hoger is bij uniforme vervuiling.

5. Besluit

Is het onkruidwerend vermogen van een voegvulling afhankelijk van de aanwezige plantensoort?

Zowel de bovengrondse biomassa als het opkomstpercentage kunnen variëren voor een voegvulling naargelang de plantensoort waartegen het materiaal weerstand moet bieden. Sommige voegvullingsmaterialen vertonen ten opzichte van andere materialen een sterk onkruidwerend vermogen ten aanzien van zekere plantensoorten, maar zijn slechts beperkt in staat andere plantensoorten te bestrijden. Hierbij spelen de eigenschappen van zowel de plantensoort (zoals zouttolerantie, droogtetolerantie of pH-gevoeligheid) als van het voegvullingsmateriaal (zoals zoutgehalte, korrelgrootteverdeling of pH) een primaire rol. Het is dan ook cruciaal dat de verwachte samenstelling van de onkruidflora voor een verharding wordt opgesteld. Met het oog op preventieve onkruidbestrijding, moet hiermee rekening worden gehouden bij de keuze van een voegvullingsmateriaal.

Is het onkruidwerend vermogen van een voegvulling afhankelijk van het neerslagregime?

De bovengrondse biomassa en het opkomstpercentage worden beïnvloed door zowel het neerslagvolume als de duur van neerslagloze periodes. Sommige materialen presteren relatief gezien goed bij een neerslagrijk regime maar zwak bij een neerslagarm regime (bijvoorbeeld grove klassieke ongebonden materialen) of vice versa (bijvoorbeeld zeezand). Dit varieert echter naargelang de plantensoort en de organische vervuiling die in de voeg aanwezig is. Initieel is het bijgevolg nuttig om met het neerslagpatroon in de streek rekening te houden bij de keuze van een voegvullingsmateriaal, maar na verloop van tijd – als de voeg onvermijdelijk vervuild geraakt en andere plantensoorten hun intrede doen – zal dit effect vermoedelijk vervagen.

Gedragen voegvullingen zich anders onder kunstmatige omstandigheden dan onder semi-natuurlijke omstandigheden?

Er zijn – naargelang de plantensoort en de vervuilingsgraad – verschillen merkbaar tussen het onkruidwerend vermogen van voegvullingen onder kunstmatige en onder semi-natuurlijke omstandigheden. Toch is het onkruidwerend vermogen van veel voegvullingen onder semi-natuurlijke omstandigheden evenwel sterk gecorreleerd met hun onkruidwerend vermogen onder kunstmatige omstandigheden. Voor veel materialen kan men dus aan de hand van proeven onder gecontroleerde omstandigheden voorspellen wat hun relatief onkruidwerend vermogen zal zijn in *in situ* verhardingen. Dit geldt in het bijzonder wanneer de materialen getest worden bij 20 vol.-% organische vervuiling.

Varieert het onkruidwerend vermogen van een voegvulling van plantensoort tot plantensoort?

Naargelang de plantensoort, varieert het onkruidwerend vermogen van veel voegvullingen sterk. Niet enkel klassieke ongebonden materialen vertonen een variërend onkruidwerend vermogen bij verschillende plantensoorten, maar ook heel wat innovatieve materialen kunnen de ene plantensoort beter bestrijden dan de andere. Hierbij treden opnieuw zowel eigenschappen van het materiaal als van de plantensoort op de voorgrond. Het verschil in onkruidwerend vermogen ten opzichte van verschillende plantensoorten kan erg groot zijn en het wordt enkel groter in vervuilde materialen. Het bepalen van de verwachte onkruidflora is bijgevolg niet enkel voor de klassieke ongebonden

materialen erg belangrijk; ook schijnbaar perfect onkruidwerende innovatieve materialen presteren beter tegen de ene plantensoort dan tegen de andere.

Hoe groot zijn de verschillen in onkruidwerend vermogen binnen en tussen categorieën van voegvullingsmaterialen?

De verschillen in onkruidwerend vermogen binnen categorieën kunnen erg hoog oplopen. Elke categorie bevat immers materialen die nagenoeg volledig onkruidwerend zijn ongeacht plantensoort of vervuilingsgraad, maar ook materialen die bij één of meerdere plantensoorten slechts beperkt onkruidwerend zijn. Vooral bij de klassieke ongebonden materialen zijn erg grote onderlinge verschillen aanwezig tussen materialen naargelang de vervuilingsgraad en de plantensoort. Bij de keuze van een voegvullingsmateriaal is het dus niet voldoende om een willekeurig materiaal te kiezen uit een categorie want de verschillen binnen een categorie kunnen erg hoog oplopen (cfr. Biozand®).

Heeft organische vervuiling en wijze waarop ze is aangebracht een significante invloed op het onkruidwerend vermogen?

Voegvullingsmaterialen vertonen – zowel absoluut als relatief – grote verschillen in onkruidwerend vermogen naargelang de aanwezigheid van organische vervuiling en de wijze waarop ze is aangebracht. Dit is zowel voor de klassieke ongebonden materialen als voor de innovatieve materialen het geval. Bij de keuze van een voegvullingsmateriaal is het dus nuttig te zoeken naar een materiaal dat zowel in zuivere als in vervuilde toestand de verwachte plantflora goed kan bestrijden. Hierbij moet men er rekening mee houden dat losse materialen doorgaans uniform vervuilen terwijl verharde materialen steeds topaagvervuiling vertonen.

6. Verder onderzoek

In deze masterproef werden de invloeden van verschillende factoren op het onkruidwerend vermogen van voegvullingen onderzocht, daarnaast werd ook onderzocht of het mogelijk is om proeven in kunstmatige omstandigheden te extrapoleren naar *in situ* omstandigheden. Hierna volgen enkele aanbevelingen voor verder onderzoek hieromtrent.

- In het kader van preventieve onkruidbestrijding is het voor heel wat Europese landen interessant om een natuurlijk, goedkoop en breed inzetbaar voegvullingsmateriaal te kunnen gebruiken. Zo kunnen kosten op de dure niet-chemische curatieve methoden bespaard worden. Daarom is het interessant natuurlijke materialen zoals zwart kwartszand en ijzerslakken die veelbelovende resultaten neerzetten in deze masterproef verder te testen. Hiertoe moeten deze materialen gedurende langere tijd blootgesteld worden aan meer plantensoorten in *in situ* verhardingen. Als dergelijke natuurlijke materialen immers een hoog onkruidwerend vermogen vertonen voor een breed spectrum planten gedurende lange tijd, kan een financieel probleem van veel openbare diensten plots opgelost worden.
- Om het onkruidwerend vermogen van concurrerende voegvullingen goed te kunnen vergelijken, zou een algemeen protocol moeten bepaald worden. Hierbij moeten omstandigheden zoveel mogelijk constant blijven. Verder onderzoek naar welke factoren zoal een rol spelen in het onkruidwerend vermogen van een materiaal naast neerslagregime (bv. luchttemperatuur, luchtvochtigheid, lichtintensiteit) zou kunnen bepalen welke factoren de plantengroei significant beïnvloeden. Vervolgens kan een methode ontwikkeld worden om materialen voor verschillende (groepen van) plantensoorten gestandaardiseerd te kunnen vergelijken.
- Een echte *in situ* proef met dezelfde materialen die in deze masterproef werden gebruikt zou veel informatie kunnen bieden omtrent in hoeverre resultaten in semi-natuurlijke omstandigheden in potjes extrapoleerbaar zijn naar situaties in natuurlijke omstandigheden (*in situ* verhardingen).
- Een proef (al dan niet *in situ*) die gedurende lange tijd aangehouden wordt kan veel informatie verschaffen omtrent de levensduur van verschillende (innovatieve) materialen. Verschillende (categorieën van) materialen hebben immers de reputatie hun onkruidwerend vermogen na enkele jaren te verliezen (door uitloging, verwerking of microbiële afbraak), waardoor de klassieke ongebonden materialen na enkele jaren misschien even onkruidwerend blijken te zijn als sommige innovatieve materialen.

Verder onderzoek

Referentielijst

- Afdeling Milieu en water, Waalse openbare dienst (2012) *Waals programma voor de reductie van pesticiden*. Waalse Overheid, Brussel, België.
- AWV (2014) *Standaardbestek 250*. Agentschap Wegen en Verkeer, Brussel, België.
- Beamix (2013) *Veiligheidsinformatieblad - Dansand Hard*. Saint-Gobain Weber Beamix B.V., Eindhoven, Nederland.
- Bedrijfschap Afbouw (2009) *Van schade tot bestek - Restauratiebestek voor stukadoorswerk*. Bedrijfschap Afbouw, Veenendaal, Nederland.
- BEELDENS A & BOONEN E (2011) *Preventief onkruidbeheer op verhardingen, bijlage bij OCW Mededelingen 86, Dossier 10*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- BEELDENS A, GENDERA F, RENS L, VAN DEN BERGHE T, VAN DEN HEYNING G & VIJVERMAN L (2008) *Waterdoorlatende verhardingen met betonstraatstenen*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- BENVENUTI S (2004) Weed dynamics in the Mediterranean urban ecosystem: ecology, biodiversity and management. *Weed Research* **44**, 341-354.
- BERNSTEIN L (1975) Effects of Salinity and Sodicity on Plant Growth. *Annual Review of Phytopathology* **13**, 295-312.
- BOGAERT S (2013) *Eco-efficiëntie en effectieve onkruidbestrijding met heet water*. Universiteit Gent, Gent, België.
- BOOGAARD F, LUCKE T & BEECHAM S (2013) Effect of Age of Permeable Pavements on Their Infiltration Function. *CLEAN - Soil, Air, Water* **42**, 146-152.
- BOONEN E (2013) *Waterdoorlatende bestratingen: een ecologische en duurzame verharding binnen het integraal waterbeleid*. OCW, Brussel, België.
- BOONEN E, DE CAUWER B, FAGOT M, BEELDENS A & REHEUL D (2013) *Handleiding voor niet-chemisch(e) onkruidbeheer(sing) op verhardingen met kleinschalige elementen*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- BRATTEBO B & BOOTH D (2003) Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research* **37**, 4369-4376.
- BROCK M & GALEN C (2005) Drought Tolerance in the Alpine Dandelion, *Taraxacum ceratophorum* (Asteraceae), Its Exotic Congener *T. officinale*, and Interspecific Hybrids under Natural and Experimental Conditions. *American Journal of Botany* **92**, 1311-1321.
- CAFFARELLI C, SENSI L, MARCUCCI F & CAVAGNI G (2000) Preseasonal local allergoid immunotherapy to grass pollen in children: a double-blind, placebo-controlled, randomized trial. *Allergy* **55**, 1142-1147.

- CHAVES M, FLEXAS J & PINHEIRO C (2009) Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany* **103**, 551-560.
- CRD-C 104-80 (1980) *Whole Building Design Guide*. Available at: https://www.wbdg.org/ccb/ARMYCOE/COESTDS/crd_c104.pdf [24 Mar 2015].
- CROW (1997) *Ontwerpvoorbeelden onkruidwerende verhardingen: ideeënboek voor constructies van elementenverhardingen die weinig kruidengroei toelaten* (ed. CROW). CROW, Ede, Nederland.
- CWEDD (2013) *Programme wallon de réduction des pesticides*. Conseil Wallon de l'Environnement pour le Développement Durable, Luik, België.
- DAEPP M, SUTER D, ALMEIDA J *et al.* (2000) Yield response of *Lolium perenne* swards to free air CO₂ enrichment increased over six years in a high N inputsystem on fertile soil. *Global Change Biology* **6**, 805-816.
- DE CAUWER B (2011) Onkruidbestrijding op halfopen verhardingen: efficiëntie en milieu-impact. *Groencontact* **37**, 16-21.
- DE CAUWER B (2013) Cursus 'Herbologie'. Universiteit Gent, Gent, België.
- DE CAUWER B (2015) Cursus 'Praktijkstudies herbologie'. Universiteit Gent, Gent, België.
- DE CAUWER B, FAGOT M, BEELDENS A, BOONEN E, BULCKE E & REHEUL D (2013a) Reduced weed growth with different paving constructions. *Weed Research* **54**, 151-161.
- DE CAUWER B, FAGOT M, BEELDENS A, BOONEN E, BULCKE E & REHEUL D (2013b) Integrating preventive and curative non-chemical weed control strategies for concrete block pavements. *Weed Research* **54**, 97-107.
- DE CAUWER B, FAGOT M, BEELDENS A, BOONEN E, BULCKE E & REHEUL D (2014) Effectiveness of water permeable joint filling materials for weed prevention in paved areas. *Weed Research* **54**, 532-540.
- DE SMET I, WHITE PJ, BENGOUGH AG *et al.* (2012) Analyzing Lateral Root Development: How to Move Forward. *Plant Cell* **24**, 15-20.
- Decagon (2015) *Decagon Devices*. Available at: www.decagon.com [7 Apr 2015].
- DEMEYERE A, GOOSSENS F, NUYTTENS D *et al.* (2013) *Praktijkgids gewasbescherming*. Vlaamse Overheid Beleidsdomein Landbouw en Visserij, Brussel, België.
- DIERKES C, KUHLMANN L, KANDASAMY J & ANGELIS G (2002) Pollution Retention Capability and Maintenance of Permeable Pavements. In: *Proceedings 2002 9th International Conference on Urban Drainage* (8-13 September 2002, Portland, Verenigde Staten). 1-13.
- DOB (2008) *DOB Preventiedocument*. Wageningen UR, Wageningen, Nederland.
- Envirobond (2011) *Material Safety Data Sheet of Envirosand*. National Fire Protection Association Quincy, Verenigde Staten.

- ERSKINE A & JONES J (1956) Fractionation of polysaccharides. *Canadian Journal of Chemistry* **34**, 821-826.
- Espace Environnement (2014) *Ma commune sans pesticide*. Espace Environnement, Charleroi, België.
- Europese Commissie (2014) *Belgian action plan to reduce the risks and impacts linked to pesticides*. Europese Commissie, Brussel, België.
- Europese Unie (2009) '24 November 2009. - Richtlijn 2009/128/EG tot vaststelling van een kader voor communicatie ter verwezenlijking van een duurzaam gebruik van pesticiden. *Publicatieblad van de Europese Unie* **309**, 71-86.
- 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* **51**, 650-660.
- Federaal Ministerie (2012) '15 December 2013. - Koninklijk besluit betreffende het federaal reductieprogramma van pesticiden voor de periode 2013-2017', p. 101713. 2013/24396.
- FREDERIKSEN J, BECK P & HVORSLEV S (2007) *Verenigde Staten Patentnr. US20070275857 A1*.
- Fvb-ffc Constructiv (2012) *Modulair handboek Bouwplaatsmachinisten*. Fonds voor Vakopleiding in de Bouwnijverheid, Brussel, België.
- Fytoweb (2015) *Fytoweb*. Available at: <http://www.fytoweb.fgov.be/indexnl.htm> [9 Feb 2015].
- GELDOF B & VAN JOOST T (1989) Epoxyhars als oorzaak van contactallergisch eczeem. *Nederlands Tijdschrift Geneeskunde* **30**, 1505-1509.
- GEORGE E, HALL M & DE KLERK G (2008) The Components of Plant Tissue Culture Media I: Macro- And Micro-Nutrients. In: *Plant Propagation by Tissue Culture*, Vol. 1. (eds E GEORGE, M HALL & G DE KLERK). 1st edn. 65-113. Springer, New York, Verenigde Staten.
- Gewestelijke Overheidsdienst Brussel (2004) Ordonnantie tot beperking van het gebruik van pesticiden door de beheerders van openbare ruimten in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest. *Belgisch Staatsblad*, p. 34276-34280. 2004/31163.
- Gewestelijke Overheidsdienst Brussel (2013) '21 Juni 2013. - Ordonnantie betreffende een pesticidegebruik dat verenigbaar is met de duurzame ontwikkeling van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest', p. 40062-40075. 2013/31469.
- GRILLI CAIOLA M, MAZZIETTI A, CAPUCCI E & TRAVAGLINI A (2002) Monitoring pollinosis and airborne pollen in a Rome university. *Aerobiologia* **18**, 267-275.
- GRUNDY A (2007) Weed occurrence on pavements in the UK: the results from a survey of Leamington Spa. *Aspects of Applied Biology* **82**, 175-182.
- GTX (2007) *Ground Trade Xchange*. Available at: http://www.groundtradesxchange.com/pavers/polymeric_sand.htm [6 Apr 2015].

- HANSEN P, KRISTOFFERSEN P & KRISTENSEN K (2004) Strategies for non-chemical weed control on public paved areas in Denmark. *Pest Management Science* **60**, 600-604.
- HANSSON D (2002) *Hot water weed control on hard surface areas*. Swedish University of Agricultural Sciences - Department of Agricultural Engineering, Alnarp, Zweden.
- HANSSON D & ASCARD J (2002) Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control. *Weed Research* **42**, 307-316.
- HEIN R (1990) *The use of rotating brushes for non-chemical weed control on paved surfaces and tarmac*. Swedish University of Agricultural Sciences - Department of Agricultural Engineering, Alnarp, Zweden.
- HRUSKA K (1995) Research on plant strategies in urban areas. In: *Applied Vegetation Ecology*, Vol. 1. (eds Y SONG, H DIERSCHKE & X WANG), 1st edn, 360-363. East China Normal University Press. Shanghai, China.
- HURSL J & NIEDERMAYR G (2003) *Geheimnisvolle Welt: Einschlüsse im Quarz*. Bode Verlag, Haltern, Duitsland.
- IGG (2012) *Safety data sheet of Rompox D1 Comp. A*. Ingenieurbüro für Gefahrstoff- und Gefahrgutberatung, Lampertheim, Duitsland.
- JAKOBSEN S (1993) Interaction between Plant Nutrients: III. Antagonism between Potassium, Magnesium and Calcium. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* **43**, 1-5.
- JARAI-KOMLODI M (2000) Some details about ragweed airborne pollen in Hungary. *Aerobiologia* **16**, 291-294.
- JENSEN T (2010) Soil pH and the availability of plant nutrients. *Plant Nutrition TODAY* **2**, 2.
- KEMPENAAR C & RUTGERS B (2009) *Onderzoek naar het effect van veegbeheer op onkruidgroei*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.
- KEMPENAAR C & SPIJKER JH (2004) Weed control on hard surfaces in The Netherlands. *Pest Management Science* **60**, 595-599.
- KEMPENAAR C, LOTZ L, RIEMENS M & KNOL J (2006) *Sustainable weed management on concrete block pavement*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.
- KEMPENAAR C, LOTZ L, VAN DER HORST C, BELTMAN W, LEEMANS K & BANNINCK A (2007) Trade off between costs and environmental effects of weed control on pavements. *Crop Protection* **26**, 430-435.
- KEMPENAAR C, SPIJKER J, VERMEULEN G & LOTZ L (2002) Rational weed control on hard surfaces. European Weed Research Society, Wageningen, Nederland.

- KEYMEULEN H, BEELDENS A, DE MYTTENAERE O *et al.* (2009) *Handleiding voor het ontwerp en de uitvoering van verhardingen in betonstraatstenen*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- KLEIN A, KARBY T & POLIVKA M (1961) Properties of an Expansive Cement for Chemical Prestressing. *American Concrete Institute Structural Journal* **58**, 59-62.
- KLUEPFEL M, LIPPERT B & WILLIAMSON J (2012) *Changing the pH of Your Soil*. Clemson University Cooperative Extension Service, Clemson, Verenigde Staten.
- KMI (2015) *Meteo*. Available at: <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/360361-Parameters.html> [19 April 2015].
- KNB (2004) *Oorzaken en preventie van witte uitslag*. Koninklijk Verbond van Nederlandse Baksteenfabrikanten, Arnhem, Nederland.
- KORTENHOFF A, KEMPENAAR C, LOTZ L, BELTMAN W & DEN BOER L (2001a) *Rational weed management on hard surfaces*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.
- KORTENHOFF A, UFFING A, KURSTJENS D & VAN ZUIJDAM R (2001b) *Bestrijding kruidengroei op ZOAB*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.
- KRISTOFFERSEN P, LARSEN S, MØLLER J & HELS T (2004) Factors affecting the phase-out of pesticide use in public areas in Denmark. *Pest Management Science* **60**, 605-612.
- KRISTOFFERSEN P, RASK A, GRUNDY A *et al.* (2008) A review of pesticide policies and regulations for urban amenity areas in seven European countries. *Weed Research* **48**, 201-214.
- LARCHER W (1994) Photosynthesis as a Tool for Indicating Temperature Stress Events. *Ecophysiology of Photosynthesis* **100**, 261-277.
- Leefmilieu Brussel (2010) *Het gebruik van recyclinggranulaten*. Leefmilieu Brussel, Brussel, België.
- Leefmilieu Brussel (2013) *Ontwerp van gewestelijk programma voor pesticidenreductie in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest 2013-2017*. Leefmilieu Brussel, Brussel, België.
- LEFEVRE L, BLANCHET P & ANGOUJARD G (2001) Non-chemical weed control in urban areas. In: *The British Crop Protection Council Conference: Weeds 2001* (ed. CR Riches), 709-714. British Crop Protection Council, Farnham, UK.
- LEOPOLDESEDER T (2011) Fugensand, der Unkraut hemmt. *Galabau* **7**, 36-39.
- LEWIS D (1982) Properties and uses of iron and steel slags. National Slag Association, Pleasant Grove, Verenigde Staten.
- LUCAS R & DAVIS J (1961) Relationships between pH values of organic soils and availability of 12 plant nutrients. *Soil Science* **92**, 177-182.
- LUCKE T & BEECHAM S (2011) Field Investigation of Clogging in a Permeable Pavement System. *Building Research and Information* **39**, 603-615.

- LUFT JH (1961) Improvements in epoxy resin embedding methods. *The Journal of Biophysical and Biochemical Cytology* **9**, 409-414.
- MCCORMACK A (2015) *Pavingexpert*. Available at: www.pavingexpert.com [3 Mar 2015].
- MELANDER B, HOLST N, GRUNDY AC *et al.* (2009) Weed occurrence on pavements in five North European towns. *Weed Research* **49**, 516-525.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2003) '18 Juli 2003. - Decreet betreffende het integraal waterbeleid', p. 55038-55077. 2003/201696.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2001) '18 April 2013. - Decreet houdende de vermindering van het gebruik van bestrijdingsmiddelen door openbare diensten in het Vlaamse Gewest', p. 23751-23755. 2013/035318.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2009) '9 December 2008. - 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. 4140. 2009/200082.
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap (2013) '8 Februari 2013. - Decreet houdende duurzaam gebruik van pesticiden in het Vlaamse Gewest', p. 11684-11686. 2013/200992.
- MOLINA-MONTENEGRO M, ATALA C & GIANOLI E (2010) Phenotypic plasticity and performance of *Taraxacum officinale* (dandelion) in habitats of contrasting environmental heterogeneity. *Biological Invasions* **12**, 2277-2284.
- MUNNS R, JAMES R & LÄUCHLI A (2006) Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany* **57**, 1025-1043.
- OCW (2013) *OCM Mededelingen oktober-november-december 2013*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- OCW (2014a) *Handleiding voor de bescherming van wegconstructies tegen de inwerking van water*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- OCW (2014b) *OCW Mededelingen oktober-november-december 2014*. Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, Brussel, België.
- OOSTERBRINK AJ (2015) Inleiding in de polymeerchemie. In: *Polymeerchemie*, Vol. 1. (eds AJ OOSTERBRINK), 1st edn, 1-24, AJ OOSTERBRINK, Breda, Nederland.
- Paving expert (2015) *Pavingexpert*. Available at: <http://www.pavingexpert.com/jointing08.htm> [3 Mar 2015].
- PERRY L (2003) *pH for the Garden*. University of Vermont Extension - Department of Plant and Soil Science, Vermont.
- PF& U MINERAL DEVELOPMENT APS (2004) *Denemarken Patentnr. 2003 01347*.
- PRATT C, MANTLE J & SCHOFIELD P (1989) Urban Stormwater Reduction and Quality Improvement through the Use of Permeable Pavements. *Water Science and Technology* **21**, 769-778.

- RASK A & KRISTOFFERSEN P (2007) A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Research* **47**, 370-380.
- RASK A, LARSEN S, ANDREASEN C & KRISTOFFERSEN P (2013) Determining treatment frequency for controlling weeds on traffic islands using chemical and non-chemical weed control. *Weed Research* **53**, 249-258.
- RIEMENS M, GROENEVELD R & UFFING A (2005) *Onkruidpreventie op verhardingen*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.
- SANALKUMAR K, LASKOWSKI K, SHUKLA V & MEREWITZ E (2013) Mitigation of Drought Stress Damage by Exogenous Application of a Non-Protein Amino Acid γ -Aminobutyric Acid on Perennial Ryegrass. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **138**, 358-366.
- SANDLER J, SHAFFER M, PRASSE T, BAUHOFFER W, SCHULTE K & WINDLE A (1999) Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties. *Polymer* **40**, 5967-5971.
- SCHOLZ M & GRABOWIECKI P (2007) Review of permeable pavement systems. *Building and Environment* **42**, 3830-3836.
- SKOUSEN J (2005) Presentatie "Micronutrients". West Virginia University, Morgantown, Verenigde Staten.
- Stones (2015) *Stones Partner of Nature*. Available at: <http://www.stones-baustoffe.de/solid-green-binder/> [6 Apr 2015].
- TSUTOMU O & ERICH M (1990) Effect of wood ash application on soil pH and soil test nutrient levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **32**, 223-239.
- VAN DE VEN G, VERMEIREN D, HEYLEN T *et al.* (2014) *Bodembewerking bij maïs*. Landbouwcentrum voor Voedergewassen, Geel, België.
- VAN DE VREKEN P, VAN HOLM L, DIELS J & VAN ORSHOVEN J (2009) *Bodemverdichting in Vlaanderen en afbakening van risicogebieden voor bodemverdichting*. Katholieke Universiteit Leuven - Spatial Applications Division, Leuven, België.
- VAN DIJK C & KEMPENAAR C (2012) *Kosten onkruidbeheer op verhardingen*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.
- VARGAS J & TURGEON A (2003) *Poa annua: Physiology, Culture, and control of Annual Bluegrass*. John Wiley & Sons. Hoboken, Verenigde Staten.
- VELT (2003) *Draaiboek voor de afbouw van bestrijdingsmiddelen door openbare diensten*. AMINAL, Brussel, België.
- VERMEULEN G, VAN ZUYDAM R & KURSTJENS D (2002) *Toepassingsmogelijkheden van niet-chemische technieken voor onkruidbestrijding op verhardingen*. IMAG, Wageningen, Nederland.

Referentielijst

- VLAREA (2005) *Vlaams reglement inzake Afvalvoorkoming en -beheer*. Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaamse Gewest, Brussel, België.
- VMM (2011) *Evolutie van het pesticidengebruik bij Vlaamse gemeenten 2003-2009*. Vlaamse Milieu Maatschappij, Brussel, België.
- VMM (2012a) *Pesticidenreductie bij openbare diensten - jaar 2010*. Vlaamse Milieu Maatschappij, Brussel, België.
- VMM (2012b) *Reguleringsimpactanalyse bij decreet en besluit gebruik van pesticiden voor niet-land-en -tuinbouwactiviteiten*. Vlaamse Milieu Maatschappij, Brussel, België.
- VMM (2014a) *kwaliteit van het drinkwater - rapporteringsjaar 2013*. Vlaamse Milieu Maatschappij, Brussel, België.
- VMM (2014b) *Welke milieuregelgeving geldt voor het gebruik van pesticiden voor niet-land en tuinbouwactiviteiten?*. Vlaamse Milieu Maatschappij, Brussel, België.
- WARREN R (1957) *Plantains*. Oregon State College, Corvallis, Verenigde Staten.
- WENTZ D (2001) *Salt Tolerance of Plants*. Government of Alberta - Agriculture and Rural Development, Edmonton, Verenigde Staten.
- WILDSCHUT A (1960) *Kunststoffen voor de ingenieur*. Uitgeverij Waltman, Delft, Nederland.
- ZWERGER P, EGGERS T, PREUSSENDORFF G & VERSCHWELE A (2000) Zur Situation der Unkrautbekämpfung im urbanen Bereich. *Stadt und Grün* **13**, 54-60.

Bijlages

Bijlage 1: Overzichtstabel van het Agentschap Wegen en Verkeer voor de gewenste dikte van de verharding, de voegbreedte en de voegvulling in functie van het verhardingstype en het bestratingsbed (AWV, 2014)

Verharding	Straatlaag	Nominale dikte (cm)	Voegbreedte	Voegvulling
In rijen te leggen kasseien	Zand	7.5	< 15 mm	Zand
	Zandcement	7.5	< 15 mm	Zandcement, split, gemodificeerde mortel
mozaïekkeien	Zand	4	< 10 mm	Zand, gemodificeerde mortel
	Zandcement	4	< 10 mm	Split, brekerzand, zandcement, gemodificeerde mortel
Betonstraatstenen	Zand	3	< 3 mm	Zand
	Granulaatmengsels 0/4	3	< 3 mm	Zand
	Granulaatmengsels 0/6.3	4	< 3 mm	Zand
	Zandcement	3	< 3 mm	Zand, split
	Zandcement	3	8 – 10 mm	Mortel, gemodificeerde mortel
	Mortel	3	< 3 mm	Zand, split
	Mortel	3	8 – 10 mm	Mortel, gemodificeerde mortel
Waterdoorlatende betonstraatstenen	Granulaatmengsels 0/6.3	4	< 3 mm	Zand
	Steenslag 2/6.3	4	< 3 mm	Zand
Betonstraatstenen met verbrede voegen of met drainageopeningen	Granulaatmengsels 0/6.3	4	Breedte van de afstandhouders	Granulaatmengsels 0/6.3, steenslag 2/4, steenslag 2/6.3
	Steenslag 2/6.3	4	Breedte van de afstandhouders	Granulaatmengsels 0/6.3, steenslag 2/4, steenslag 2/6.3
Gebakken straatstenen	Zand	4	< 3 mm	Zand
	Mortel	3	10 – 15 mm	Mortel (voegijzer)
Betontegels	Zand	3	Tegels met velling: < 3 mm Tegels zonder velling: 3 – 5 mm	Zand
	Zandcement	3	Tegels met velling: < 3 mm Tegels zonder velling: 3 – 5 mm	Zand
	Zandcement	3	8 – 10 mm	Mortel
	Mortel	2.5	Tegels met velling: < 3 mm Tegels zonder velling: 3 – 5 mm	Zand
	Mortel	2.5	8 – 10 mm	Mortel
Grasbetontegels	Bodemsubstraat met zand	5	2 – 4 mm	Bodemsubstraat, bodemzand
	Bodemsubstraat met steenslag	5	2 – 4 mm	Bodemsubstraat, bodemzand
	Steenslag 2/6.3	4	2 – 4 mm	Steenslag 2/6.3
Natuursteentegels	Zandcement	3	8 – 10 mm	Gemodificeerde mortel
	Mortel	2.5	8 – 10 mm	Gemodificeerde mortel
Gras-kunststofplaten	Bodemsubstraat	5	Aansluitend	Aansluitend
	Steenslag 2/6.3	4	Aansluitend	Steenslag 2/6.3

Bijlages

Bijlage 2: Definiëring van de verkeersklassen (Boonen et al., 2013)

Verkeersklasse	Soort van verkeer		
	Voetgangers, fietsers, bromfietzers	Lichte voertuigen (< 3.5 ton)	Zware voertuigen (> 3.5 ton)
I	Onbeperkt	Maximaal 5000 per dag	Maximaal 400 per dag
II	Onbeperkt	Maximaal 5000 per dag	Maximaal 100 per dag
III	Onbeperkt	Maximaal 500 per dag	Maximaal 20 per dag
IV	Onbeperkt	Occasioneel	Geen

Bijlage 3: Gemiddelde dagtemperatuur en -neerslag in Melle tijdens de experimenten in de gaasserre (Exp. 2 van 4 juli t.e.m. 1 september 2014; Exp. 3 van 16 juli t.e.m. 16 september 2014)

Dag	Temperatuur (°C)	Neerslag (mm)	Dag	Temperatuur (°C)	Neerslag (mm)
4/jul/14	23.4	4.2	11/aug/14	20.4	2.1
5/jul/14	22.3	4.2	12/aug/14	20.3	2.1
6/jul/14	20.7	4.2	13/aug/14	20.8	2.1
7/jul/14	23.2	4.2	14/aug/14	19.1	2.1
8/jul/14	18.7	4.2	15/aug/14	19.8	2.8
9/jul/14	15.0	4.2	16/aug/14	20.0	2.8
10/jul/14	18.2	4.2	17/aug/14	17.0	2.8
11/jul/14	18.1	2.1	18/aug/14	19.8	2.8
12/jul/14	18.7	2.1	19/aug/14	18.0	2.8
13/jul/14	21.3	2.1	20/aug/14	18.0	2.8
14/jul/14	26.2	2.1	21/aug/14	18.4	2.8
15/jul/14	20.0	2.1	22/aug/14	15.8	2.8
16/jul/14	28.2	3.5	23/aug/14	17.9	2.8
17/jul/14	31.9	3.5	24/aug/14	19.2	2.8
18/jul/14	33.8	3.5	25/aug/14	15.9	2.1
19/jul/14	30.2	3.5	26/aug/14	16.2	2.1
20/jul/14	26.0	3.5	27/aug/14	21.4	2.1
21/jul/14	20.8	3.5	28/aug/14	19.8	2.1
22/jul/14	27.5	3.5	29/aug/14	21.3	2.1
23/jul/14	31.3	3.5	30/aug/14	18.0	2.1
24/jul/14	30.3	3.5	31/aug/14	19.4	2.1
25/jul/14	26.8	3.5	1/sep/14	21.5	2.8
26/jul/14	27.7	3.5	2/sep/14	22.0	2.8
27/jul/14	26.8	3.5	3/sep/14	20.6	2.8
28/jul/14	21.5	3.5	4/sep/14	21.7	2.8
29/jul/14	23.0	3.5	5/sep/14	22.6	2.8
30/jul/14	24.6	3.5	6/sep/14	19.5	2.8
31/jul/14	26.8	3.5	7/sep/14	23.8	2.8
1/aug/14	27.1	3.5	8/sep/14	21.5	2.8
2/aug/14	26.7	3.5	9/sep/14	18.5	2.8
3/aug/14	26.2	3.5	10/sep/14	17.8	2.8
4/aug/14	23.9	2.1	11/sep/14	17.9	2.8
5/aug/14	25.8	2.1	12/sep/14	20.4	2.8
6/aug/14	19.4	2.1	13/sep/14	18.5	2.8
7/aug/14	23.4	2.1	14/sep/14	18.6	2.8
8/aug/14	20.4	2.1	15/sep/14	22.2	2.8
9/aug/14	22.7	2.1	16/sep/14	22.2	2.8
10/aug/14	19.8	2.1			