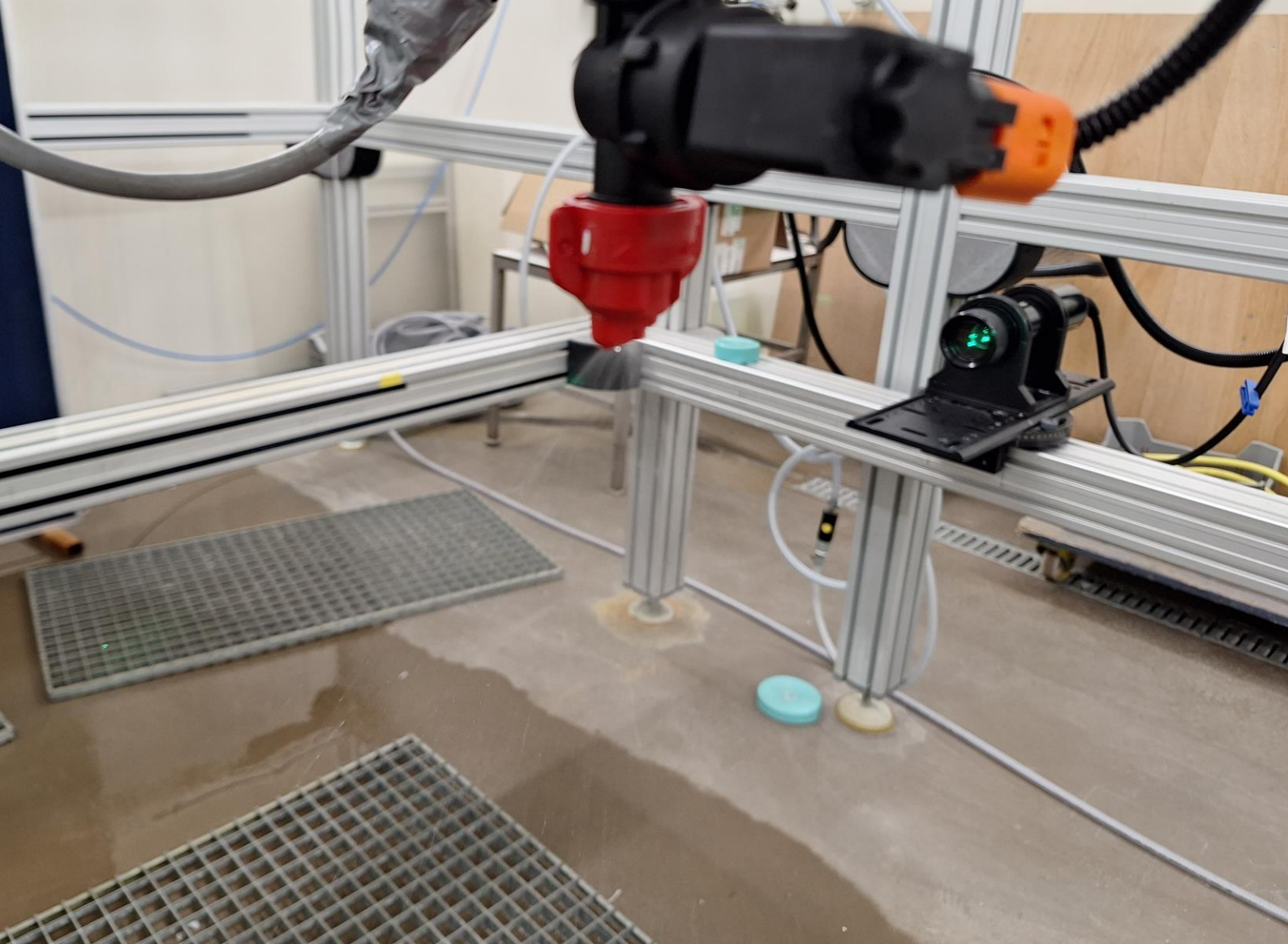




Het effect van PWM op driftreductie van een spuitdop

Effecten van Pulse Width Modulation op druppelgroottes, -snelheden en drift(reductie)

Dirk de Hoog, Gerrit van Steenberg, Ard Nieuwenhuizen en Marcel Wenneker

WPR-1420



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Het effect van PWM op driftreductie van een spuitdop

Effecten van Pulse Width Modulation op druppelgroottes, -snelheden en drift(reductie)

Dirk de Hoog, Gerrit van Steenberg, Ard Nieuwenhuizen en Marcel Wenneker

Wageningen University & Research

Dit onderzoek is uitgevoerd door de Stichting Wageningen Research (WR), business unit Agrosysteemkunde, in opdracht van en gefinancierd door Topsector TKI onder subsidieovereenkomstnummer: LWV19035. LWV19035 Innovatieve emissieloze toedieningstechnieken 4.0 (project nummer BO-67-001-020).

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, Januari 2025

Rapport WPR-1420

Hoog, D.C. de, G. van Steenberg, A.T. Nieuwenhuizen & M. Wenneker, 2024. *Het effect van PWM op driftreductie van een spuitdop; Effecten van Pulse Width Modulation op druppelgroottes, -snelheden en drift(reductie)*. Wageningen Research, Rapport WPR-1420. 21 blz.; 10 fig.; 4 tab.; 16 ref.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/685803>

Pulse width modulation (PWM) systems are used in agricultural spray applications to change the applied rate of plant protection products without having to change the pressure on the application system or the nozzle. The assumption is that this can be done without major effects on other spraying characteristics which contribute to off-field spray drift, such as droplet size and speed. Previous studies, as well as this study, however show there is an effect of applying PWM to spraying characteristics of the used nozzle and consequently on spray drift. In this study, 3 different nozzle types at 4 different PWM duty cycle settings were measured using a PDPA system. The results show that both droplet speed and droplet size are effected using PWM. For the Dutch authorities, drift reduction of nozzles used in downward spraying is determined using the IDEFICS model. Nozzles used for up- and sideward spraying are classified for drift reduction by comparing the V_{100} (volume fraction in droplets smaller than 100 μm) to reference nozzles. For both situations the percentage drift reduction decreases when the PWM duty cycle decreases. With this reduction there is the possibility that a nozzle should be classified in a lower nozzle drift reduction class when using PWM at specified settings.

Trefwoorden: pulse width modulation, PWM, spray drift

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Agrosysteemkunde, Postbus 16, 6700 AA Wageningen; T 0317 48 07 00; www.wur.nl/plant-research

KvK: 09098104 te Arnhem
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport WPR-1420

Foto omslag: Dirk de Hoog

Inhoud

1	Introductie	7
2	Materiaal en methode	8
	2.1 Driftreductie neerwaartse bespuitingen	9
	2.2 Driftreductie op- en zijwaartse bespuitingen	10
3	Resultaten	11
	3.1 Dopafgifte	11
	3.2 Druppelgrootteverdelingen	11
	3.3 Gemiddelde druppelsnelheid	16
	3.4 Driftreductie	16
	3.4.1 Neerwaartse driftreductie	16
	3.4.2 Op- en zijwaartse driftreductie	17
4	Discussie	18
5	Conclusie	19
	Literatuur	20
Bijlage 1	PDPA druppelgroottemetingen	21

1 Introductie

Met pulse width modulation (PWM) systemen op veld- en fruitteeltspuiten wordt de afgifte van de spuitdop nauwkeurig en onafhankelijk van de spuitdruk geregeld. PWM systemen worden gebruikt bij conventionele volveldsbespuitingen, het variabel toepassen met variabel rate applications en bij precisiebespuitingen zoals spot spray toepassingen vanwege de snelle schakeltijden van de PWM kleppen.

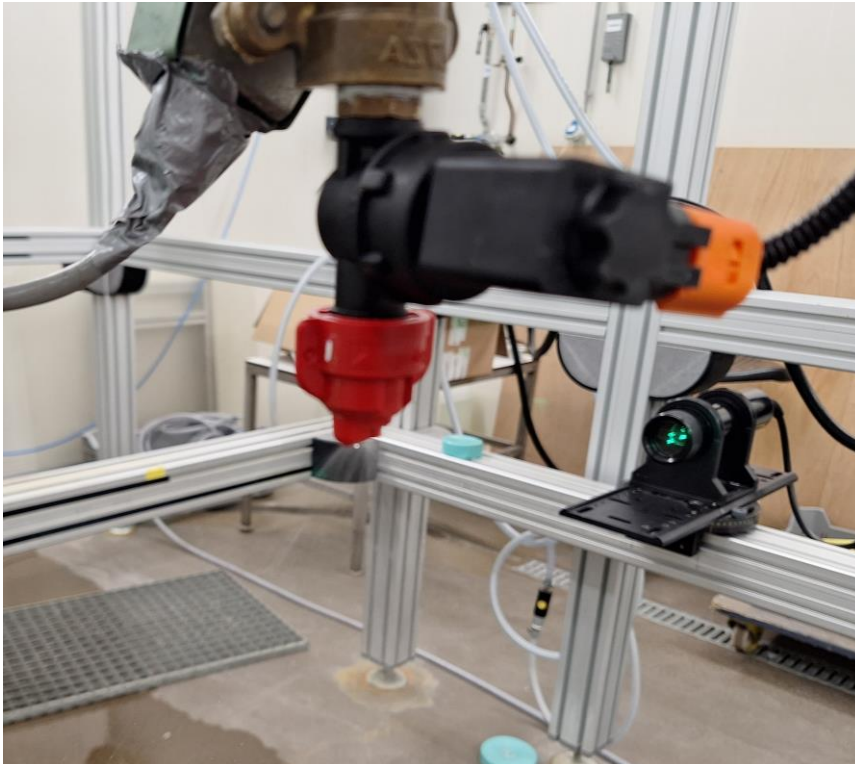
Druppelgroottemetingen laten zien dat PWM systemen druppelgrootte en druppelsnelheid kunnen beïnvloeden (Butts et al., 2018; Butts, 2019; Grella et al., 2022; Lang, 2013), maar het effect op driftreductie is hierbij niet vastgesteld. Butts et al. (2018) gebruikte een Capstan SharpShooter PWM systeem met een frequentie van 10 Hz in combinatie met 11 doptypen, 6 puls configuraties, 3 spuitdrukken en 2 spuitoplossingen om de impact op druppelsnelheid te bepalen. De experimenten zijn uitgevoerd in een windtunnel en de metingen werden gedaan met een Shadowgraphy systeem. De druppelsnelheden daalden bij het verlagen van de duty cycle. Bij 80% duty cycle met 2-16% en bij 60% duty cycle met 7-27% vergeleken met de druppelsnelheid bij 100% duty cycle. Bij lagere duty cycles was de snelheidsreductie niet altijd consistent. Luchtinjectordoppen hadden een grotere variabiliteit en reductie in druppelsnelheden dan niet-luchtinjectordoppen in combinatie met het PWM systeem. In het algemeen steeg de gemiddelde druppelgrootte bij een dalende PWM duty cycle (Butts, 2019). Druppelspectra met hetzelfde SharpShooter PWM systeem werden bepaald met een Oxford Laser systeem bij 3 bar spuitdruk (Lang, 2013). Bij de meeste spuitdoppen steeg de gemiddelde druppelgrootte (VMD) bij het verlagen van de PWM duty cycle. De grootste variabiliteit werd hierbij gemeten bij de laagste PWM duty cycles. De V_{100} , volumefractie druppels kleiner dan 100 μm , steeg daarentegen juist bij het verlagen van de PWM duty. Grella et al. (2022) bepaalde het effect van PWM duty cycle en spuitdruk op druppelgrootte en druppelsnelheid van het TeeJet DynaJet systeem (20 Hz) met een PDPA meetsysteem. Hierbij werd de standaard spleetdop XR 80-02 VS gebruikt op 4 bar met een PWM duty cycle van 30%, 50%, 70% en 100%. Er werd geen duidelijk effect op gemiddelde druppelgrootte gemeten. De V_{100} steeg echter van $4.9 \pm 0.2\%$ naar $6.2 \pm 0.7\%$ bij het verlagen van de duty cycle van 100% naar 30%. De gemiddelde druppelsnelheid daalde hierbij van 4.4 ± 0.2 m/s naar 3.0 ± 0.2 m/s.

In Nederland wordt er op dit moment geen onderscheid gemaakt in het wel of niet gebruiken van een PWM-systeem met geclassificeerde spuitdoppen. In Duitsland worden door het Julius Kühn-Institut (JKI) geclassificeerde spuitdoppen standaard één driftreductieklasse verlaagd als deze gebruikt worden in combinatie met een erkend PWM-systeem (JKI, 2025). Zo worden spuitdoppen in driftreductieklassen 95%, 90% en 75% verlaagd naar respectievelijk driftreductieklassen 90%, 75% en 50%. Een alternatief hiervoor is het testen van spuitdoppen met specifieke spuitdop/spuitdruk/PWM systeem/PWM duty cycle combinatie. Een voorbeeld hiervan is de TeeJet AIC 110-05 VP spuitdop in combinatie met het TeeJet DynaJet (20 Hz) PWM-systeem. Deze spuitdop valt in de 50% driftreductie klasse met een minimale duty cycle van 50% en een maximale spuitdruk van 6 bar of een minimale duty cycle van 30% en een maximale spuitdruk van 4 bar. Dezelfde spuitdop is geclassificeerd als een 75% driftreducerende dop met een minimale duty cycle van 30% en een maximale spuitdruk van 2 bar, terwijl bij dezelfde spuitdruk van 2 bar met uitgeschakeld PWM (100% duty cycle) de dop is geclassificeerd als 90% driftreducerend (JKI, 2025).

Verkennde metingen met PWM systemen van verschillende fabrikanten bevestigden een effect op spuitdrift (De Hoog et al., 2023a, 2023b, 2023c, 2023d). De verschillen tussen de verschillende PWM systemen waren echter minimaal. Naar aanleiding van deze resultaten is in dit onderzoek een uitgebreide serie metingen uitgevoerd met het Rometron PWM systeem, één van de systemen uit de verkennende metingen. Door het uitvoeren van druppelgroottemeten met drie verschillende typen spuitdoppen (standaard flat fan, voorkamerspleetdop en luchtinjectordop) in combinatie met vier verschillende PWM duty cycles is het effect op druppelgrootte en druppelsnelheid vastgesteld. De impact op spuitdrift is berekend met driftmodel IDEFICS. De metingen en berekeningen zijn uitgevoerd volgens het meetprotocol voor het vaststellen van driftreductie van spuitdoppen (I&W, 2021), met uitzondering van het bepalen van de V_{100} van de grensdoppen voor op- en zijwaartse bespuitingen.

2 Materiaal en methode

In het kader van het project IET 4.0 zijn druppelgroottemetingen gedaan met een PWM systeem van Rometron. Hier zijn 3 doppen voor geselecteerd: een 'standaard' TeeJet XR 110 04 spleetdop (hierna: XR), een Agrotop SoftDrop 110 04 (DRD 75% bij 3 bar (TCT, 2024), hierna SD) en een Lechler IDK 90 025C (DRD 75% bij 3 bar (TCT, 2024), hierna IDK). Van deze doppen is de druppelgrootteverdeling gemeten bij 4 verschillende PWM duty cycles: 100%, 75%, 50% en 25%. Het Rometron systeem werkte voor al deze instellingen op een frequentie van 50 Hz. Voor de metingen is het meetprotocol voor het meten van driftreductie van spuitdoppen (MinI&W, 2021) gebruikt.



Figuur 1 Het Rometron systeem in de meetopstelling. In plaats van een standaard dophouder is de door Rometron ondersteunde Arag dophouder geïnstalleerd.

Er is een Arag dophouder gebruikt in combinatie met een Rometron PWM-klep. Rometron gebruikt zogenoemde filler plugs om de vloeistofkamer in de dophouder kleiner te maken en deze zijn dus ook toegepast in deze metingen. Door snel te pulseren wordt het gespoten volume geregeld. Alle metingen zijn uitgevoerd met 3 bar waterdruk, gemeten met een drukmeter net voor de dophouder en PWM klep. De metingen zijn in negenvoud uitgevoerd (3 herhalingen met 3 doppen), met 12 verschillende configuraties (3 doptypes, 4 PWM duty cycles). In totaal zijn er dus 108 metingen met het PWM systeem uitgevoerd. Elke meting beslaat minimaal 10.000 druppels. Het meetprotocol (I&W, 2021) voor het classificeren van driftreducerende doppen is gevolgd voor de metingen.



Figuur 2 De gebruikte doppen (rechts): van links naar rechts de TeeJet XR 110 04, de Lechler IDK 90 025C en de Agrotop SoftDrop 110 04.

2.1 Driftreductie neerwaartse bespuitingen

Voor de 12 gemeten dop-PWM duty cycle combinaties is de driftreductie voor neerwaartse spuittechnieken uitgerekend door middel van IDEFICS simulaties (Holterman et al., 1997). De IDEFICS berekeningen zijn verder ook volgens het meetprotocol (I&W, 2021) uitgevoerd en de driftreductie is vervolgens uitgerekend ten opzichte van de BCPC fijn/midden referentiedop (Lurmark 31-03-F110, British Crop Protection Council, Southcombe et al., 1997) welke op dezelfde dag en op dezelfde wijze is gemeten.

De resultaten van de metingen van de druppelgrootteverdeling en de druppelsnelheden werden als invoer in het driftmodel IDEFICS-win (versie 1.04; Oktober 2023) gebruikt.

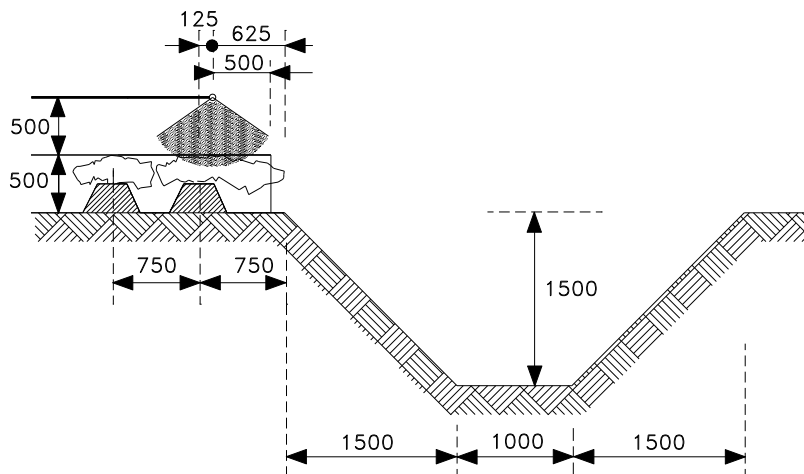
De volgende instellingen waren van toepassing:

- positie van de laatste spuitdop 0.50 m binnen het gewas *
- een dophoogte van 0.50 m boven het gewas;
- afstand tussen doppen aan de spuitboom;
 - o 0.25 m voor spuitdoppen met tophoek 80°-90°
 - o 0.50 m voor spuitdoppen met tophoek 110°-130°
- een gewashoogte van 0.50 m;
- rijnsnelheid 1.67 m/s (= 6.0 km/u);
- rijrichting evenwijdig aan de gewasrand;
- windrichting loodrecht op de gewasrand van het gewas af gericht;
- windsnelheid 3 m/s (op 2 m hoogte);
- relatieve luchtvochtigheid 60%;
- luchttemperatuur 15°C;
- stabiliteit van de atmosfeer neutraal (geen thermiek).

* De uitgangssituatie was een gewas aardappelen met de laatste rug op 0.75 m van de insteek van de sloot, bij een dopafstand van 0.50 m staat de buitenste spuitdop op 0.125 m buiten het midden van de laatste rug; gewasontwikkeling tot de insteek. Bij de berekeningen met IDEFICS is ter correctie van een aflopende gewasrand de afstand van de laatste dop tot de gewasrand afgerond op 0.50 m (zie Figuur 3).

De volvelds simulaties zijn in vijfvoud uitgevoerd, met 30.000 druppels per dop, voor 14 doppen verdeeld over een spuitbreedte van 50 m. Door middel van interpolatie en extrapolatie voor niet gesimuleerde doppen is een simulatie van een volvelds bespuiting mogelijk.

De resultaten van de modelberekeningen gaven de depositiewaarden op aaneensluitende strookjes met breedte 0.25 m, gerekend vanaf de gewasrand. Deze resultaten werden bewerkt tot gemiddelde deposities op de strook 2.125-3.125 m vanaf de laatste spuitdop. Dit is de strook waarvoor bij de gekozen uitgangssituatie voor aardappelen het wateroppervlak van de sloot ligt (Huijsmans et al., 1997).



Figuur 3 Overzicht van de situatie voor de modelberekeningen bij een gewas aardappelen (afmetingen in mm).

2.2 Driftreductie op- en zijwaartse bespuitingen

Bij de fruitteelt wordt de driftreductie d.m.v. grensdoppen op basis van V_{100} bepaald (op- en zijwaartse technieken, I&W, 2021). De driftreductie bepalingsmethode is dus alleen afhankelijk van druppelgroottes, door middel van de V_{100} , andere eigenschappen zoals tophoek en druppelsnelheid worden niet van belang geacht voor bepaling van driftreductie bij op- zijwaarts spuiten. De druppelgroottemetingen met PWM instellingen in dit onderzoek zijn weliswaar met voldoende herhalingen en doppen uitgevoerd volgens het protocol, echter de gewenste grensdoppen voor een relatie met de driftreductieclassen in de fruitteelt zijn niet in dezelfde reeks gemeten. De V_{100} waardes van de grensdoppen zijn gebaseerd op recente meetdata (Holterman et al., 2022), zie Tabel 1.

Tabel 1 Driftreductiegrensdoppen voor op- en zijwaartse bespuitingen. De V_{100} waarden zijn gebaseerd op metingen gerapporteerd in Holterman et al. (2022).

Grensdop	Doctype	Druk [bar]	V_{100} [%]
Fruit referentie	Albuz ATR 80	7	24.7
DRD 50	TeeJet DG 80 02	7	5.05
DRD 75	Albuz AVI 80 015	7	3.10
DRD 90	Lechler ID 90 01 C	5	0.74
DRD 95	Albuz TVI 80 025	7	0.29

3 Resultaten

De resultaten van de dopafgifte-, druppelgrootte- en druppelsnelheidsmetingen en de driftreductieberekeningen worden in dit hoofdstuk besproken.

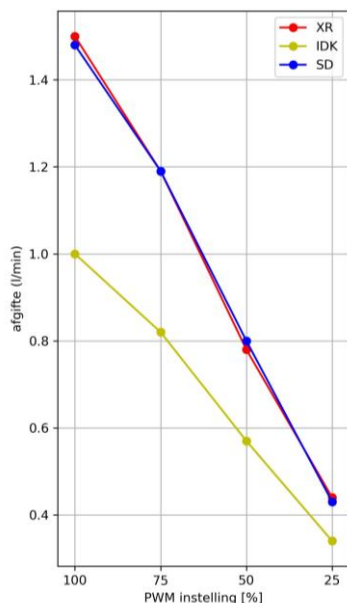
3.1 Dopafgifte

De gemeten dopafgiftes staan in Tabel 2 en Figuur 4.

Tabel 2 De gemeten afgifte bij 3 bar waterdruk en verschillende PWM duty cycles van de verschillende spuitdoppen.

Spuitdop	Dopafgifte (l/min)			
	100% duty cycle	75% duty cycle	50% duty cycle	25% duty cycle
XR 110 04	1.50	1.19	0.78	0.44
IDK 90 025	1.00	0.82	0.57	0.34
SD 110 04	1.48	1.19	0.80	0.43

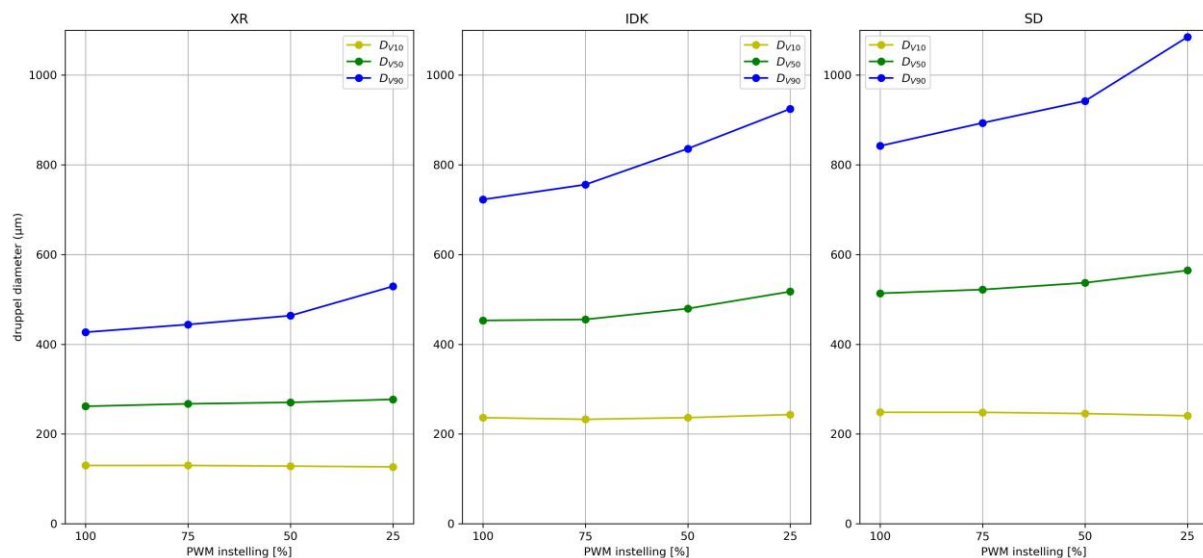
De afgifte bij 100% duty cycle van de IDK 90 025 dop is bijna gelijk aan de verwachte waarde van 0.99 l/min (TeeJet, 2023). De afgiftes van de doppen met grootte 04 bij 100% duty cycle zijn beide ongeveer 0.1 l/min lager dan de verwachte waarde van 1.58 l/min.



Figuur 4 De gemeten afgifte (liter per minuut) voor de verschillende doppen uitgezet tegen de PWM duty cycle instelling.

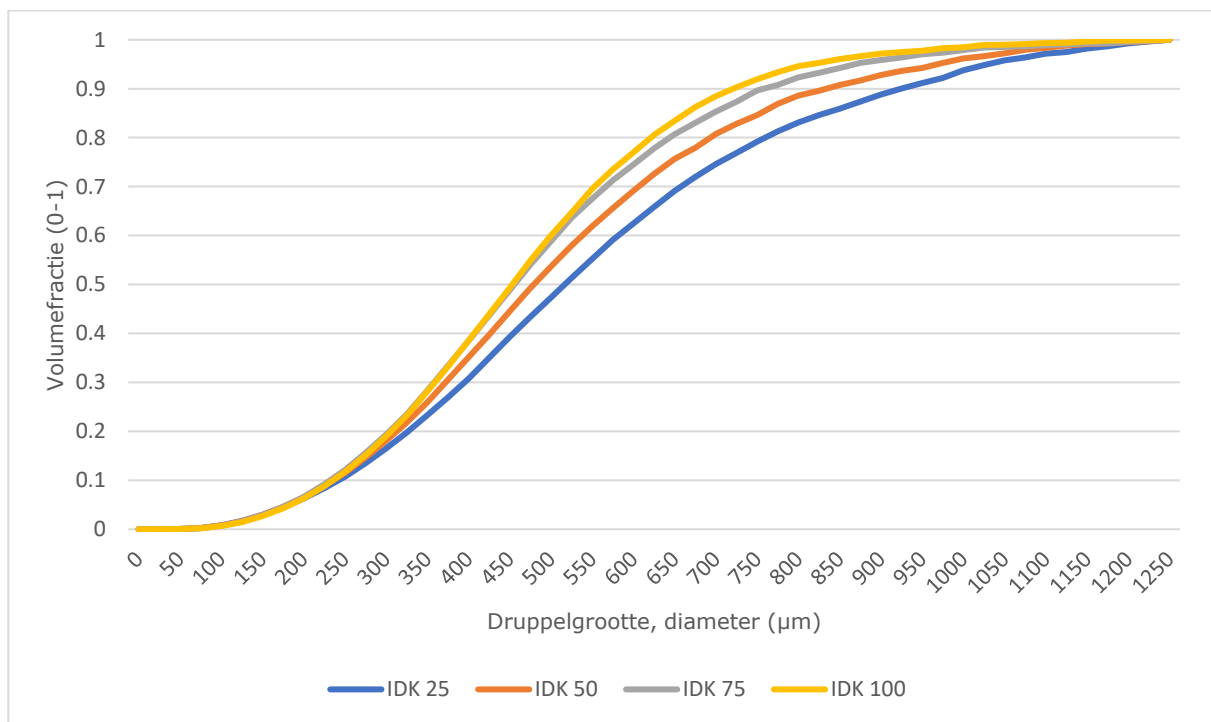
3.2 Druppelgrootteverdelingen

In Figuur 5 staan de D_{V10} , D_{V50} en D_{V90} waarden ten opzichte van een lager wordende duty cycle weergegeven. Bij de D_{V10} wil dit zeggen dat 10% van het gespoten volume in druppels zit onder het getal in de grafiek. In het geval van de XR dop bij 100% PWM duty cycle is dus 10% van het volume in druppels kleiner dan 130 micrometer.



Figuur 5 De druppelgrootte per volumefractie uitgezet tegen de PWM instelling voor de verschillende doppen.

In Figuur 6 zijn de verschillende cumulatieve volume fracties ten opzichte van een lager wordende duty cycle voor de IDK dop weergegeven.

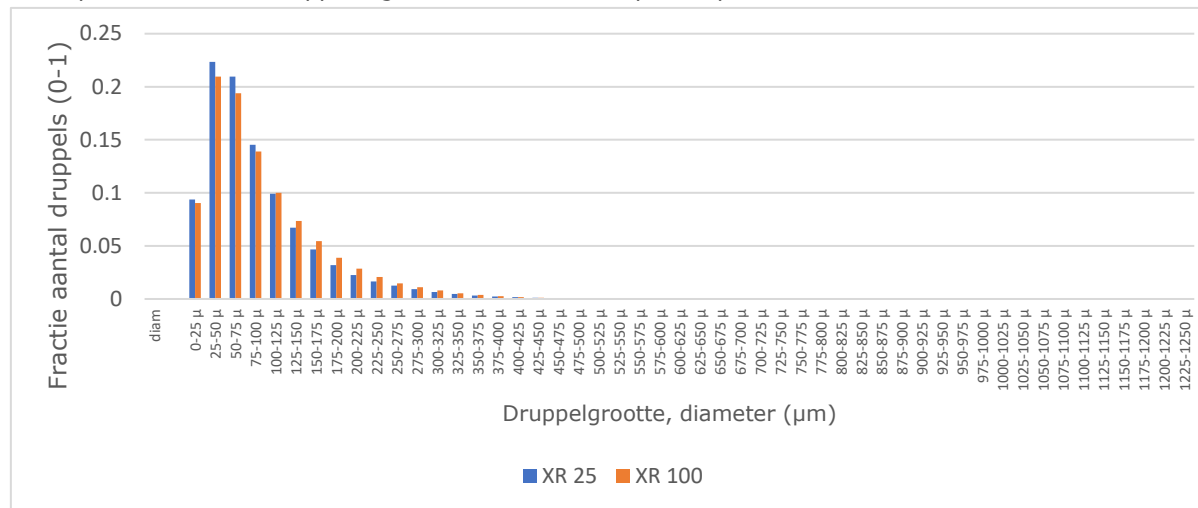


Figuur 6 De cumulatieve volume fractie voor de verschillende PWM duty cycle instellingen met de IDK dop.

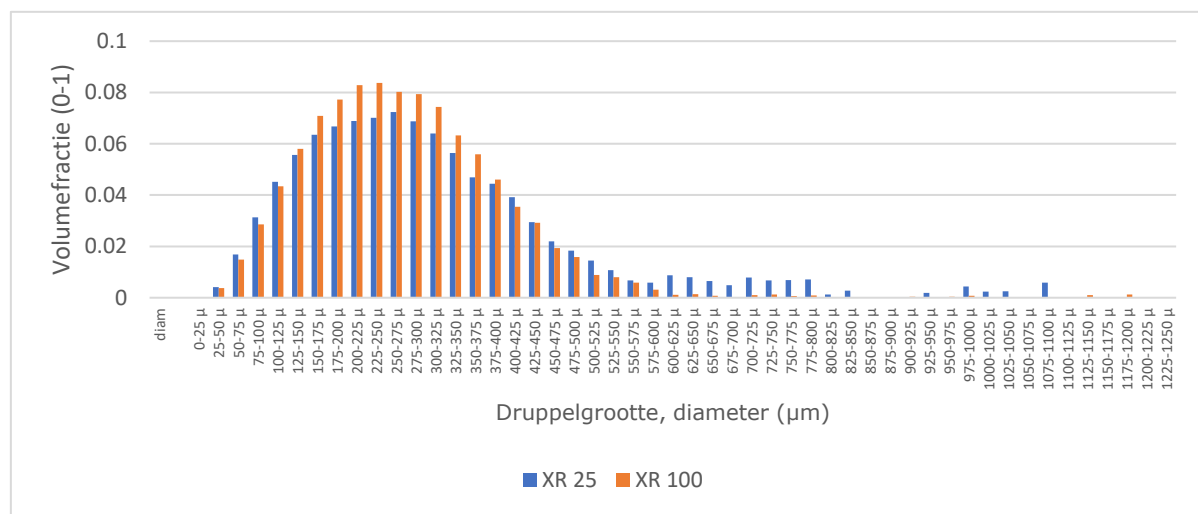
De bovenstaande grafiek is genormaliseerd tot 1, wat inhoudt dat waar de lijn 1 bereikt, 100% van het volume in druppels onder deze diameter zit. De 100% PWM duty cycle instelling bereikt als eerste 1 en de andere PWM instellingen zitten hier op volgorde onder.

In Figuur 7 zijn telkens alleen de PWM duty cycle instellingen 25% en 100% weergegeven om de meest onderscheidende situaties te visualiseren.

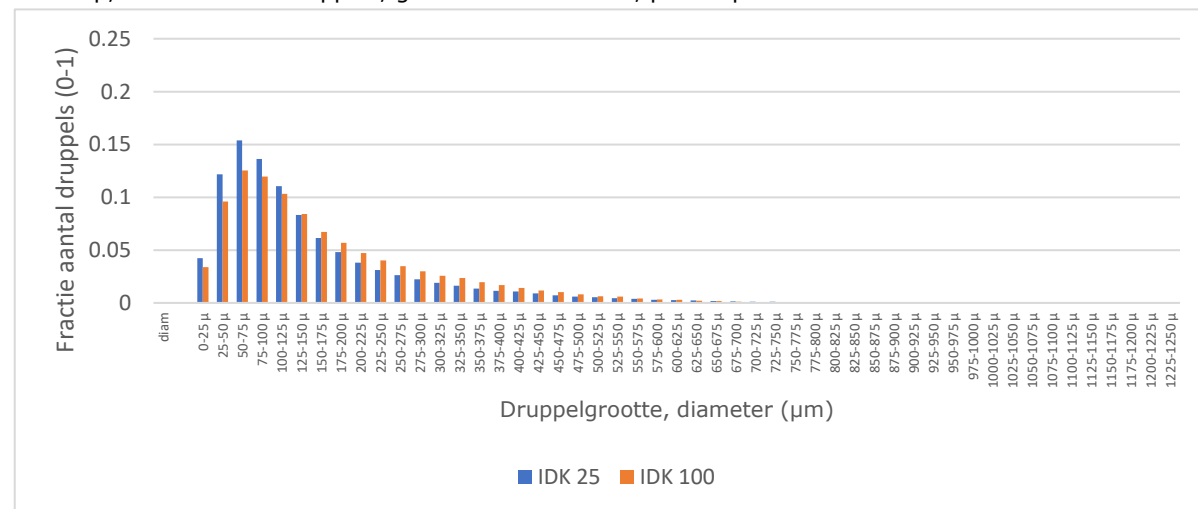
XR dop, fractie aantal druppels, genormaliseerd tot 1, per 25 µm klasse.



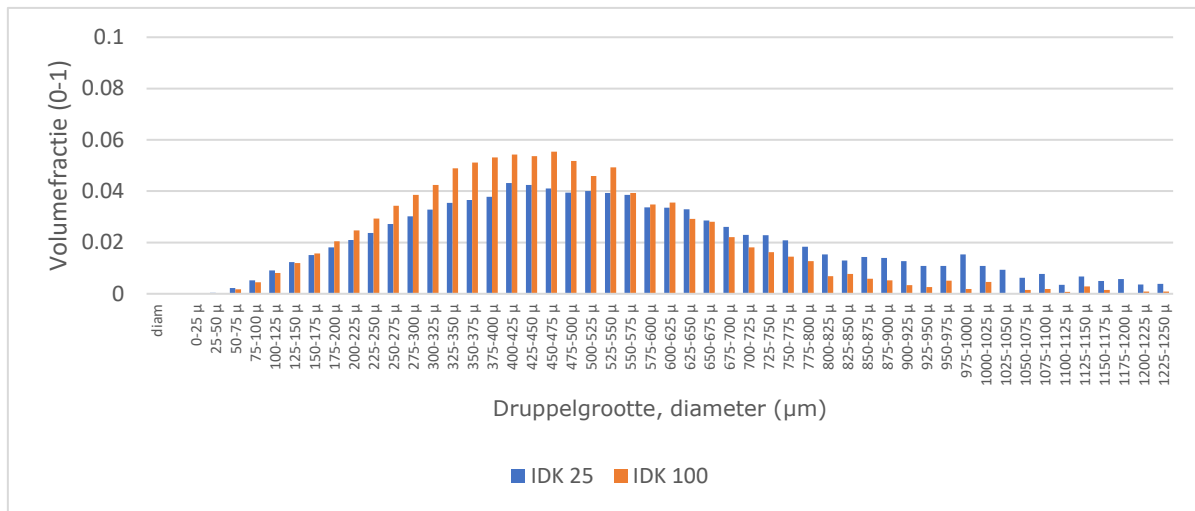
XR dop, volumefractie, genormaliseerd tot 1, per 25 µm klasse.



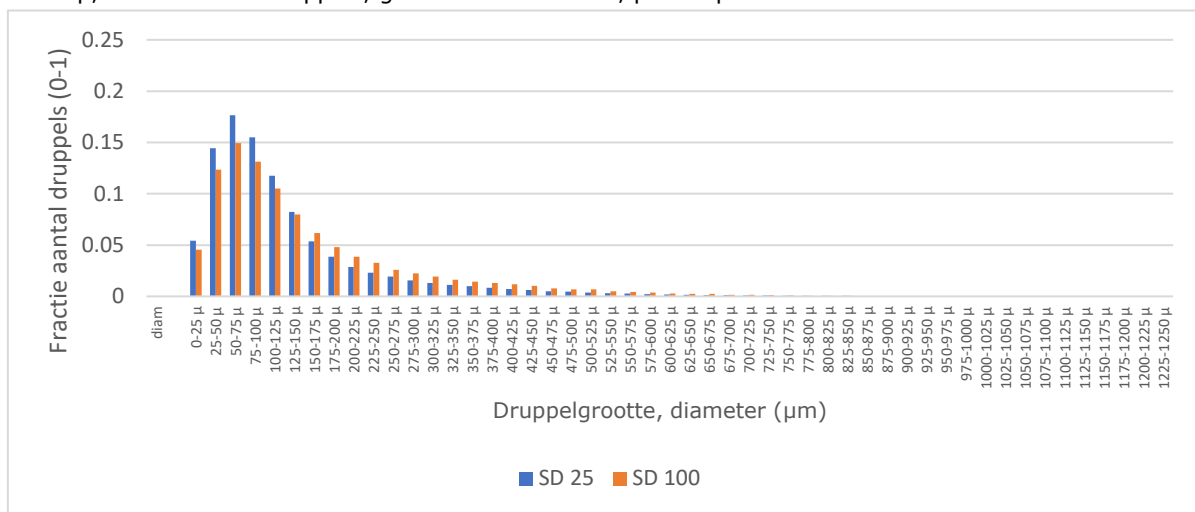
IDK dop, fractie aantal druppels, genormaliseerd tot 1, per 25 µm klasse



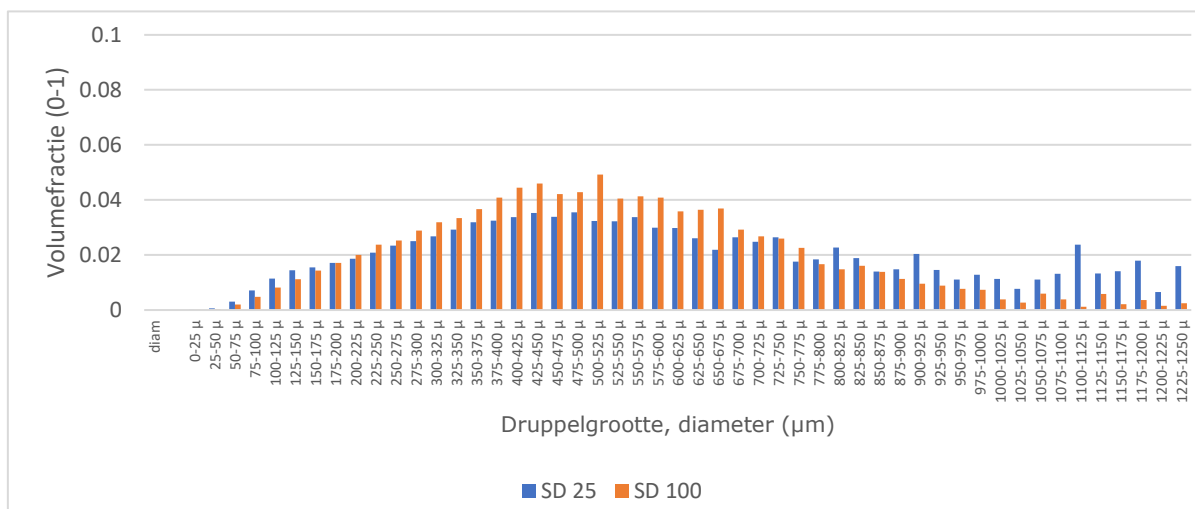
IDK dop, volumefractie, genormaliseerd tot 1, per 25 μm klasse.



SD dop, fractie aantal druppels, genormaliseerd tot 1, per 25 μm klasse.



SD dop, volumefractie, genormaliseerd tot 1, per 25 μm klasse.

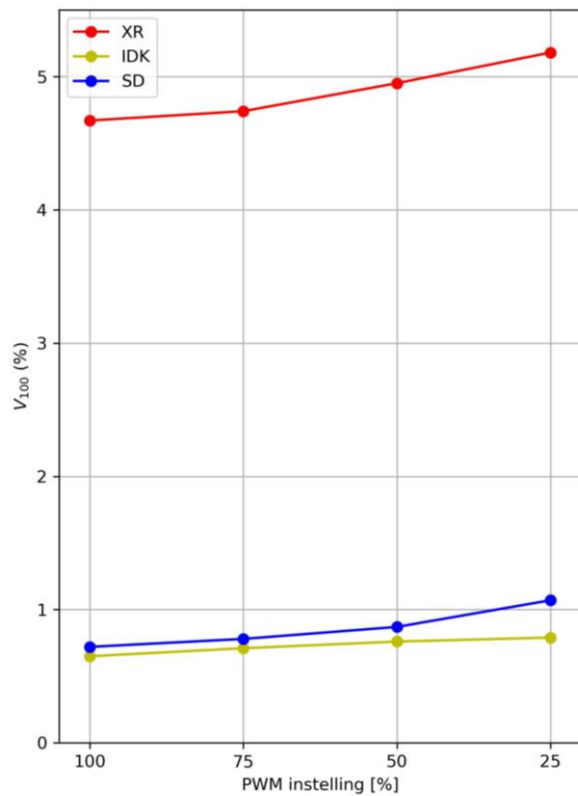


Figuur 7 Fractie aantal druppels en volume fractie per druppelgrootte, in stappen van 25 μm . Bij elke dop voor de 25% en 100% PWM duty cycle instelling. De grafieken zijn genormaliseerd naar 1, wat inhoudt dat de waarden voor alle klassen bij elkaar opgeteld 1 is.

In Figuur 7 staat voor elke dop, voor de 25% en 100% duty cycle PWM duty cycle instelling, de fractie van het aantal druppels en de volume fractie per druppelgrootte uitgewerkt. Hier valt op dat vooral bij de IDK en

de SD doppen, zowel het aantal kleine druppels, als het aantal grote druppels toeneemt. In de figuren met de fractie van het aantal druppels kan men zien dat het aantal druppels kleiner dan ongeveer 150 μm toeneemt. Bij het aantal grote druppels gaat het om zulke kleine aantallen druppels, dat bijna alleen zichtbaar zijn in de volume fractie, een klein aantal grote druppels heeft immers nog steeds een groot volume. Bij een PWM duty cycle instelling van 25% ligt een groter druppelvolumen in het gebied vanaf ongeveer 700 μm dan bij een PWM duty cycle van 100%. In het tussenliggende gebied heeft deze niet pulserende instelling een groter volume aan druppels.

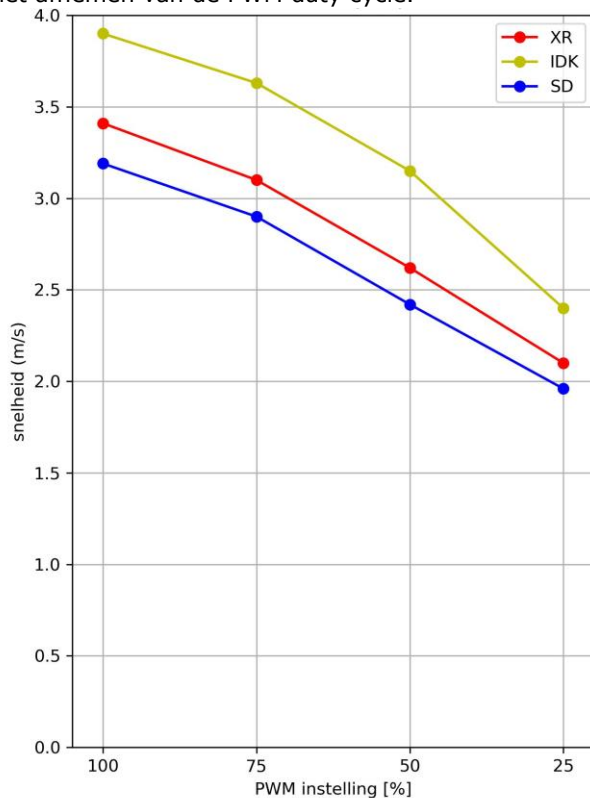
De volume fractie druppels kleiner dan 100 μm (V_{100}) van de spuitdoppen bij een afnemende PWM duty cycle is weergegeven in Figuur 8. De V_{100} heeft een grote invloed op de driftpotentialaal aangezien deze kleine druppels het meest gevoelig zijn voor wind.



Figuur 8 De V_{100} (volume fractie onder de 100 μm , in procent) voor de verschillende doppen bij de verschillende PWM duty cycle instellingen.

3.3 Gemiddelde druppelsnelheid

De gemiddelde snelheid (Figuur 9) van de druppels neemt consequent af voor de verschillende doppen bij het afnemen van de PWM duty cycle.



Figuur 9 De gemiddelde druppelsnelheden (m/s) voor de verschillende doppen bij de verschillende PWM instellingen.

3.4 Driftreductie

De resultaten van de driftclassificatie voor neerwaartse en op- en zijwaartse bespuitingen zijn in de volgende paragrafen weergegeven.

3.4.1 Neerwaartse driftreductie

Het IDEFICS driftmodel is gebruikt om de depositie van spuitvloeistof te berekenen voor een volvelds behandeling met een spuitboom die was uitgerust met de spuitdoppen en PWM systeem in deze studie. Deze driftdeposities werden vergeleken met de deposities voor een referentiebehandeling met de BCPC-F/M spuitdoppen op de spuitboom. De resultaten worden weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Driftreductie uitgerekend met IDEFICS voor 12 dop-PWM duty cycle combinaties. Ook de tophoeken zijn van invloed op de IDEFICS berekeningen en zijn daarom voor deze combinaties gemeten, de waarden staan in de tabel.

Dop	Duty Cycle [%]	Tophoek [°]	Driftreductie [%]	Driftreductieklasse
XR	100	119	9.8	-
	75	119	10.2	-
	50	121	9.4	-
	25	121	7.3	-
IDK	100	76	82.5	DRD 75
	75	78	80.7	DRD 75
	50	80	78.2	DRD 75
	25	81	77.9	DRD 75
SD	100	98	80.0	DRD 75
	75	98	79.4	DRD 75
	50	101	77.0	DRD 75
	25	102	72.2	DRD 50

Uit Tabel 3 blijkt dat de XR dop niet driftreducerend is en de IDK dop en de SD dop een driftreductie hebben in de 75% klasse bij 100% duty cycle. Zowel de IDK dop als de SD dop wordt minder driftreducerend naarmate de duty cycle lager wordt. De SD dop komt bij 25% duty cycle onder de klassegrens van DRD 75 uit en valt hierbij in de DRD 50 klasse.

3.4.2 Op- en zijwaartse driftreductie

De V_{100} waarden van de grensdoppen uit eerder uitgevoerde metingen zijn gebruikt, zie Tabel 1. Daarom is alleen de indicatieve driftreductieklasse voor op- en zijwaartse bespuitingen weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Driftreductie indicatie voor op- en zijwaartse bespuitingen. Per dop-PWM instelling is de indicatieve DRD klasse weergegeven.

Doptype	PWM duty cycle [%]	V_{100} [%]	Indicatieve driftreductieklasse
XR	100%	4.67	DRD 50
	75%	4.74	DRD 50
	50%	4.95	DRD 50
	25%	5.18	-
IDK	100%	0.65	DRD 90
	75%	0.71	DRD 90
	50%	0.76	DRD 75
	25%	0.79	DRD 75
SD	100%	0.72	DRD 90
	75%	0.78	DRD 75
	50%	0.87	DRD 75
	25%	1.07	DRD 75

Gesteld dat de grensdoppen wel gemeten waren in de reeks in dezelfde meetserie:

- De XR gaat dan van DRD 50 bij 100% duty cycle naar 'geen DRD klasse' bij 25% duty cycle.
- De andere 2 doppen gaan van DRD 90 naar DRD 75 naarmate de duty cycle lager wordt. De IDK dop vanaf 50% PWM duty cycle en de SD dop al vanaf 75% PWM duty cycle.

De V_{100} loopt bij alle 3 de doppen op naar mate de PWM duty cycle lager wordt. Doppen welke gebruikt worden met een PWM systeem zouden dus in een lagere klasse kunnen komen te vallen bij gebruikt van PWM.

4 Discussie

De bepaling van D_{V90} wordt relatief sterk beïnvloed door grotere druppels, omdat grote druppels veel volume hebben, en is de invloed van een klein aantal druppels dus al merkbaar. Bij het sluiten van de PWM klep kunnen, vooral bij luchtinjectordoppen, grote druppels ontstaan (Lang, 2013). Dit effect kan samenhangen met de trend die we in deze metingen zien, namelijk dat het spuitbeeld gemiddeld grover wordt. Bij de druppelgrootteverdelingen is gebleken dat er zowel grove als fijne druppels bij komen bij het gebruik van een lagere PWM duty cycle. Het aantal grove druppels zou ervoor kunnen zorgen dat de drift lager wordt, maar ook het aantal fijne druppels gaat omhoog (tot ongeveer $150\ \mu\text{m}$). Dit resulteert dan weer in meer drift. Dit laatste effect kan men ook zien in de ontwikkeling van de V_{100} (Figuur 8), die omhoog gaat bij lagere PWM duty cycles. Als laatste heeft ook de druppelsnelheid effect op de drift (Figuur 9). Lagere snelheden resulteren in meer drift. Dit is waarschijnlijk het gevolg van dat er in verhouding meer tijd wordt op- en afgebouwd in spuitbeeld en minder tijd gewoon continu gespoten wordt naarmate de duty cycle afneemt.

Het driftmodel IDEFICS, dat wordt gebruikt om de drift(reductie) uit te rekenen, is niet gevalideerd voor bespuitingen met PWM-systemen. In principe is er geen aanleiding om aan te nemen dat IDEFICS niet gebruikt zou kunnen worden. Er zijn wel aanwijzingen dat het snelheidsprofiel van druppels in de spuitkegel bij PWM-gepuleerde doppen anders kan zijn dan bij conventionele systemen. Bij conventionele systemen neemt de druppelsnelheid af met toenemende afstand vanaf de spuitdop. Bij sommige PWM-systemen nam de druppelsnelheid eerst toe alvorens af te nemen met de afstand vanaf de spuitdop. Het driftmodel IDEFICS veronderstelt een snelheidsprofiel voor conventionele systemen. Een daarvan afwijkend snelheidsprofiel kan een effect hebben op de berekende driftdepositie. Naar verwachting is dit effect gering, omdat andere factoren belangrijker zijn voor driftdepositie (zoals windsnelheid, spuitboomhoogte en druppelgrootteverdeling).

De resultaten van de druppelgrootte- en snelheidsmetingen in dit onderzoek sluiten aan bij eerder uitgevoerde metingen (Butts et al., 2018; Butts, 2019; Grella et al., 2022; Lang, 2013). De impact op drift(reductie) werd in deze onderzoeken niet bepaald, maar de resultaten bevestigen wel dat de V_{100} stijgt bij het dalen van de PWM duty cycle, en er dus meer driftgevoelige druppels ontstaan. De druppelsnelheid daalt ook, wat de druppels gevoeliger maakt voor drift.

5 Conclusie

Het gebruik van PWM bij bespuitingen heeft invloed op het driftpotentiala. Zowel het aantal fijne als het aantal grove druppels gaat omhoog, waarbij vooral de fijne druppels bijdragen aan meer drift. Dit effect is ook zichtbaar in de V_{100} , welke hoger wordt bij lagere PWM duty cycles. Door het constant openen en sluiten van het systeem gaat de gemiddelde snelheid van de druppels naar beneden, wat ook zorgt voor meer drift.

Uit de IDEFICS berekeningen blijkt dat alle doppen een lagere driftreductie laten zien bij lagere PWM duty cycles. De gemeten druppelgroottes, snelheden en tophoeken worden meegenomen in de berekeningen van het model IDEFICS. De afname in driftreductiepercentage varieert van ongeveer 3% bij de XR dop bij de verschillende PWM instellingen, 5% bij de IDK dop tot 8% bij de SD dop. Dit kan betekenen dat grenswaarden van een driftreductieklasse overschreden worden.

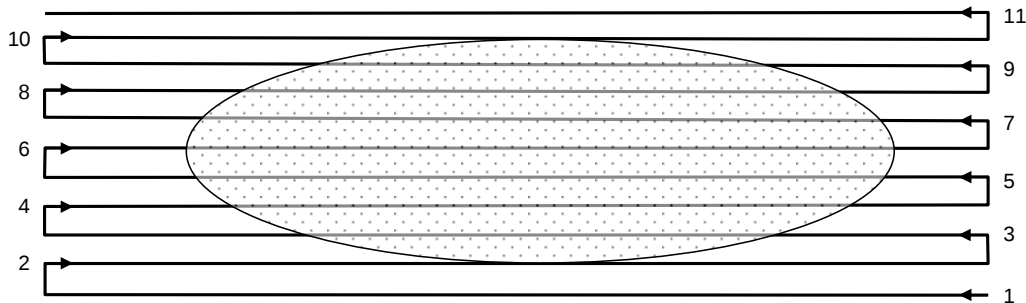
Voor op- en zijwaartse bespuitingen wordt uitgegaan van grensdoppen en gerekend op basis van V_{100} , ook hier wordt de driftreductie lager naarmate de PWM duty cycle lager wordt. Ook hier kan dit betekenen dat grenswaarden van een driftreductieklasse overschreden worden.

Literatuur

- Butts, T., Kruger, G., Hoffmann, W., & Luck, J., 2018. Droplet velocity from broadcast agricultural nozzles as influenced by pulse-width modulation. In 38th Symposium on Pesticide Formulation and Delivery Systems: Innovative Application, Formulation and Adjuvant Technologies (pp. 24-52). ASTM International.
- Butts, T. R., Butts, L. E., Luck, J. D., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., & Kruger, G. R., 2019. Droplet size and nozzle tip pressure from a pulse-width modulation sprayer. *Biosystems engineering*, 178, 52-69.
- De Hoog, D.C., H.J. Holterman, G. van Steenbergen, A.T. Nieuwenhuizen & M. Wenneker. 2023a. IET 4.0 druppelgroottemetingen Agrifac PWM systeem. Wageningen Research, Vertrouwelijk Rapport.
- De Hoog, D.C., H.J. Holterman, G. van Steenbergen, A.T. Nieuwenhuizen & M. Wenneker. 2023b. IET 4.0 druppelgroottemetingen Homburg-Hardi-TeeJet PWM systeem. Wageningen Research, Vertrouwelijk Rapport.
- De Hoog, D.C., H.J. Holterman, G. van Steenbergen, A.T. Nieuwenhuizen & M. Wenneker, 2023c. IET 4.0 druppelgroottemetingen Kverneland-Raven PWM systeem. Wageningen Research, Vertrouwelijk Rapport.
- De Hoog, D.C., H.J. Holterman, G. van Steenbergen, A.T. Nieuwenhuizen & M. Wenneker. 2023d. IET 4.0 druppelgroottemetingen Rometron PWM systeem. Wageningen Research, Vertrouwelijk Rapport.
- Grella, M., Gioelli, F., Marucco, P., Zwervaeagher, I., Mozzanini, E., Mylonas, N., Nuytens, D. & Balsari, P., 2022. Field assessment of a pulse width modulation (PWM) spray system applying different spray volumes: duty cycle and forward speed effects on vines spray coverage. *Precision Agriculture*, 23(1), 219-252.
- Holterman, H.J., J.C van de Zande, H.A.J Porskamp en J.F.M Huijsmans, 1997. Modelling spray drift from boom sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture* 19 (1997): p1-22.
- Holterman, H. J., & van de Zande, J. C. (2022). Onderzoek aan spuitdoppen TeeJet AI 80015VS en AI 8002VS voor classificatie op basis van driftgevoeligheid. (Rapport / Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Business unit Agrosysteemkunde; No. WPR-997). Wageningen Plant Research. <https://doi.org/10.18174/546835>
- Huijsmans, J.F.M., H.A.J. Porskamp en J.C. van de Zande, 1997. Drift(beperking) bij de toediening van gewasbeschermingsmiddelen. Evaluatie van de drift van spuitvloeistof bij bespuitingen in de fruitteelt, de volveldsteelten en de boomteelt (stand van zaken december 1996). IMAG-DLO Rapport 97-04, IMAG, Wageningen, 38 pp.
- I&W, 2021. Meetprotocol voor het vaststellen van de driftreductie van spuitdoppen voor neerwaartse en op- en zijwaartse bespuiting - versie 2 november 2021. <https://iplo.nl/thema/water/afvalwater-activiteiten/agrarische-activiteiten/vaststellen-driftreductie-spuitechnieken/>
- JKI, 2025. DAPS - Datenbank der Anwendungstechnik für Pflanzenschutzgeräte und Saatgutbehandlungseinrichtungen; JKI-anerkannte Pulsweitenmodulationssysteme. <https://daps.julius-kuehn.de/pwm>
- Lang, J. P., 2013. Evaluation of pulse width modulation sprays for spray quality. In 2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Southcombe, E.S.E., P.C.H. Miller, H. Ganzelmeier, J.C. van de Zande, A. Miralles & A.J. Hewitt, 1997. The international (BCPC) spray classification system including a drift potential factor. *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference - Weeds*, 1997. November 1997. Brighton. UK. p.371-380.
- TCT, 2024. Lijst met indeling van spuitdoppen in DriftReducerende Dop-klassen (DRD-klassen); DRD-lijst. Technische Commissie Techniekbeoordeling (TCT). Versie 8 november 2024. <https://iplo.nl/thema/water/afvalwater-activiteiten/agrarische-activiteiten/vaststellen-driftreductie-spuitechnieken/>
- TeeJet, 2023. Catalog 52-M. <https://www.teejet.com/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat52-m.pdf>

Bijlage 1 PDPA druppelgroottemetingen

Van de geselecteerde doppen werd het druppelgroottespectrum bepaald met een Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA, TSI). De spuitvloeistof hierbij was leidingwater met een temperatuur van 20°C. De meetruimte werd ingesteld op een temperatuur van 20°C en een relatieve luchtvochtigheid van 70%. Bij de metingen van het druppelgroottespectrum beschreef de doppositie een patroon van 11 parallelle banen (Figuur 10). De lengte van de banen en hun onderlinge afstand werden per situatie zodanig ingesteld, dat het banenpatroon het totale spuitpatroon goed afdekte. De snelheid waarmee het banenpatroon werd doorlopen, werd daarbij zodanig afgesteld, dat ten minste 10000 druppels per meting werden gemeten. De dophoogte was 0,30 m boven het meetvlak. De meethoogte boven de vloer bedroeg 0,70 m.



Figuur 10. *Patroon van de banen voor het scannen van de druppelgrootteverdeling in een horizontaal vlak 0,30 m onder een spuitkegel van een spleetdop. De baanlengte en de onderlinge baanafstand werden aangepast aan de spuitpatronen van de te meten doppen. Baan 6 is de middelste baan loodrecht onder de dop.*

De PDPA was tijdens de metingen als volgt ingesteld:

- Laservermogen in meetpunt 25 mW
- Focus frontlens transmitter 1000 mm
- Focus frontlens detector 1000 mm
- Expander/contractor contractor
- Detectiehoek 40°
- Detectorspanning 540 V
- Signaaldrempel 50 mV
- Meetbereik 5 - 1250 μm
- Diameter resolutie 2,4 μm
- Probe Volume Correction ja

Het laservermogen werd vooraf aan elke meting gecontroleerd en zo nodig bijgesteld. Ook de inkoppeling van de laserstralen in de glasvezels in de zogenaamde 'fiber-drive' werd voorafgaande aan elke meting gecontroleerd. Deze mechanische koppeling is gevoelig voor temperatuurveranderingen en trillingen. Daarbij was steeds het nuttig laservermogen ter plaatse van de feitelijke druppelgroottemetingen leidend: dit vermogen werd constant gehouden op de genoemde waarde van 25 mW.

De resultaten van de druppelgroottemetingen worden gepresenteerd als de D_{V10} , D_{V50} , D_{V90} en V_{100} .

Hieronder volgt een korte toelichting op deze begrippen:

- D_{V10} [μm]; 10% van het volume bestaat uit druppels die een diameter hebben die kleiner is dan de waarde van D_{V10} ;
- D_{V50} [μm] = VMD [μm] (Volume Median Diameter); 50% van het volume bestaat uit druppels die een diameter hebben die kleiner is dan de waarde van D_{V50} ;
- D_{V90} [μm]; 90% van het volume bestaat uit druppels die een diameter hebben die kleiner is dan de waarde van D_{V90} ;
- V_{100} [%]; volumepercentage van druppels met een diameter kleiner dan 100 μm .

Correspondentie adres voor dit rapport:

Postbus 16

6700 AA Wageningen

T 0317 48 07 00

wur.nl/plant-research

Rapport WPR-1420



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.700 medewerkers (7.000 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.
