

# VERTICAL FARMING AND BEYOND

## HOE BEÏNVLOEDT HET LICHTSPECTRUM IN EEN VERTICAL FARM DE NAOOGSTKWALITEIT EN HOUDBAARHEID VAN SLA?

Lauriane Van Wilder

Studentennummer: 01910191

Promotoren: Prof. dr. ir. Emmy Dhooghe, Prof. dr. ir. Frank Devlieghere

Tutor: ir. Ellen Van de Velde

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad in Master of Science in de bio-  
ingenieurswetenschappen: landbouwkunde

Academiejaar: 2023-2024

## Copyrightverklaring

De auteur en de promotor geven de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit de masterproef.

The author and the promotor give permission to use this thesis for consultation and to copy parts of it for personal use. Every other use is subject to the copyright laws, more specifically the source must be extensively specified when using results from this thesis.

Gent, juni 2024

De promotoren,  
Prof. dr. ir. Emmy Dhooghe

Prof. dr. ir. Frank Devlieghere

De tutor,  
ir. Ellen Van de Velde

De auteur,  
Lauriane Van Wilder

## Woord vooraf

Een masterthesis markeert het einde van een vijfjaar lange studie, een periode die niet altijd gemakkelijk verloopt. Gelukkig stond ik er niet alleen voor. Daarom zou ik bij aanvang van deze masterthesis graag enkele mensen bedanken die voor mij, in het bijzonder dit jaar, veel betekend hebben. In de eerste plaats zou ik graag mijn tutor Ellen Van de Velde bedanken. Ze heeft mij gedurende dit jaar enorm veel bijgeleerd en al mijn vragen altijd met veel enthousiasme beantwoord. Ze prikkelde mijn interesse voor wetenschappelijk onderzoek en was een waar voorbeeld voor mij.

Ook wil ik graag mijn promotor prof. Emmy Dhooghe bedanken, in de eerste plaats voor het toekennen van het onderwerp waarin ik me zo graag wou verdiepen. Daarnaast ben ik haar dankbaar voor haar aanstekelijke enthousiasme, haar luisterend oor en motiverende woorden, voor de begeleiding en constructieve feedback. Verder bedank ik graag ook mijn promotor prof. Frank Devlieghere voor de opportuniteit om me in dit onderwerp te verdiepen, voor zijn input, voor zijn constructieve feedback en voor het beschikbaar stellen van zijn labo.

In de onderzoeksgroep Horticulture bedank ik graag Christophe Petit voor de technische hulp bij problemen. Ik heb ook in het labo van Food Microbiology and Food Preservation verschillende protocollen en toestellen ontdekt dankzij Ann Dirckx, Danny Pauwels en Thomas De Bock. Dank aan hun allen voor hun uitleg en tijd.

Tot slot wil ik ook mijn dank uitspreken aan mijn ouders, die mij niet alleen dit jaar, maar altijd onvoorwaardelijk hebben gesteund en geholpen. In het bijzonder wil ik mijn moeder bedanken voor het meermaals nalezen van mijn masterproef en het geven van constructieve feedback.

Aan allen, een oprechte dank u wel uit de grond van mijn hart om mij dit jaar te begeleiden, te helpen en te doen groeien en voor alle kansen die ik kreeg!

# INHOUDSOPGAVE

|          |                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INLEIDING.....</b>                                                              | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>LITERATUURSTUDIE.....</b>                                                       | <b>8</b>  |
| 2.1      | SLA ( <i>LACTUCA SATIVA</i> L.) EN DE SITUERING VAN DE SLATEELT IN VLAANDEREN..... | 8         |
| 2.2      | VERTICAL FARMING .....                                                             | 10        |
| 2.2.1    | Voordelen .....                                                                    | 12        |
| 2.2.1.1  | Opbrengst en voedselzekerheid .....                                                | 12        |
| 2.2.1.2  | Efficiëntie .....                                                                  | 12        |
| 2.2.1.3  | Ecosysteemvriendelijk.....                                                         | 13        |
| 2.2.1.4  | Gezondheid en voedselveiligheid .....                                              | 13        |
| 2.2.1.5  | Economische voordelen.....                                                         | 13        |
| 2.2.2    | Nadelen en uitdagingen .....                                                       | 15        |
| 2.2.2.1  | Kosten .....                                                                       | 15        |
| 2.2.2.2  | Gewaskeuze .....                                                                   | 15        |
| 2.2.2.3  | Gezondheid.....                                                                    | 15        |
| 2.2.2.4  | Overige uitdagingen.....                                                           | 16        |
| 2.3      | LICHT.....                                                                         | 16        |
| 2.3.1    | Lichtkwaliteit .....                                                               | 16        |
| 2.3.1.1  | Fotosynthetisch actieve straling (PAR).....                                        | 16        |
| 2.3.1.2  | Andere golflengtes.....                                                            | 19        |
| 2.3.2    | Lichtkwantiteit.....                                                               | 20        |
| 2.3.3    | Fotoperiode .....                                                                  | 20        |
| 2.3.4    | End of Production (EoP)- en naoogstlichtbehandelingen .....                        | 21        |
| 2.3.5    | Belichtingsapparatuur in vertical farming.....                                     | 21        |
| 2.4      | KWALITEIT .....                                                                    | 22        |
| 2.4.1    | Nutritionele kwaliteit.....                                                        | 22        |
| 2.4.1.1  | Suikers en vezels .....                                                            | 22        |
| 2.4.1.2  | Vitaminen.....                                                                     | 22        |
| 2.4.1.3  | Carotenoiden .....                                                                 | 22        |
| 2.4.1.4  | Polyfenolen .....                                                                  | 23        |
| 2.4.1.5  | Nitraten.....                                                                      | 23        |
| 2.4.1.6  | Mineralen.....                                                                     | 23        |
| 2.4.2    | Organoleptische kwaliteit.....                                                     | 24        |
| 2.4.2.1  | Textuur.....                                                                       | 24        |
| 2.4.2.2  | Smaak.....                                                                         | 24        |
| 2.4.2.3  | Geur .....                                                                         | 25        |
| 2.4.2.4  | Visueel aspect .....                                                               | 25        |
| 2.5      | HOUDBAARHEID.....                                                                  | 26        |
| 2.5.1    | Bederf.....                                                                        | 26        |
| 2.5.1.1  | Respiratie en transpiratie.....                                                    | 26        |
| 2.5.1.2  | Enzymatische bruinverkleuring.....                                                 | 27        |
| 2.5.1.3  | Microbieel bederf .....                                                            | 27        |
| 2.5.2    | Verbeteren van de houdbaarheid.....                                                | 28        |
| 2.5.2.1  | Invloed van temperatuur en relatieve vochtigheid.....                              | 28        |
| 2.5.2.2  | Invloed van licht .....                                                            | 28        |
| 2.5.2.3  | Verpakking onder gemodificeerde atmosfeer (MAP) .....                              | 29        |
| 2.5.2.4  | Andere factoren .....                                                              | 29        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAAL EN METHODEN .....</b>                                                 | <b>30</b> |

|          |                                                                                                                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1      | PLANTMATERIAAL EN KIEMINGSPERIODE .....                                                                                                                                | 30        |
| 3.2      | EXPERIMENT 1: INVLOED VAN LICHTKWALITEIT EN PLANTDICHTHEID OP HET VOORKOMEN VAN RAND .....                                                                             | 31        |
| 3.2.1    | <i>Bladoppervlakte en beoordeling van rand</i> .....                                                                                                                   | 33        |
| 3.2.2    | <i>Vers- en drooggewicht</i> .....                                                                                                                                     | 34        |
| 3.2.3    | <i>Pigmenten</i> .....                                                                                                                                                 | 34        |
| 3.2.4    | <i>Nitraten</i> .....                                                                                                                                                  | 35        |
| 3.3      | EXPERIMENT 2: INVLOED VAN LICHTKWALITEIT EN BEWAARTEMPERATUUR OP DE KWALITEIT EN HOUDBAARHEID VAN<br>VERSNEDEN SLA, VERPAKT ONDER GEMODIFICEERDE ATMOSFEER (MAP) ..... | 35        |
| 3.3.1    | <i>Vers- en drooggewicht</i> .....                                                                                                                                     | 38        |
| 3.3.2    | <i>Suikers</i> .....                                                                                                                                                   | 38        |
| 3.3.3    | <i>Pigmenten</i> .....                                                                                                                                                 | 39        |
| 3.3.4    | <i>Vitamine C</i> .....                                                                                                                                                | 39        |
| 3.3.5    | <i>Microbiële contaminatie: bepaling van het totaal aeroob, psychotroof kiemgetal</i> .....                                                                            | 39        |
| 3.3.6    | <i>Lekkage van elektrolyten</i> .....                                                                                                                                  | 40        |
| 3.3.7    | <i>Sensorische beoordeling</i> .....                                                                                                                                   | 40        |
| 3.4      | STATISTISCHE DATA-ANALYSE.....                                                                                                                                         | 41        |
| 3.5      | GEBRUIK VAN CHATGPT .....                                                                                                                                              | 41        |
| <b>4</b> | <b>RESULTATEN</b> .....                                                                                                                                                | <b>42</b> |
| 4.1      | EXPERIMENT 1: INVLOED VAN LICHTKWALITEIT EN PLANTDICHTHEID OP HET VOORKOMEN VAN RAND .....                                                                             | 42        |
| 4.1.1    | <i>Planteigenschappen en rand</i> .....                                                                                                                                | 42        |
| 4.1.2    | <i>Pigmenten en nitraten</i> .....                                                                                                                                     | 44        |
| 4.2      | EXPERIMENT 2: INVLOED VAN LICHTKWALITEIT EN BEWAARTEMPERATUUR OP DE KWALITEIT EN HOUDBAARHEID VAN<br>VERSNEDEN SLA, VERPAKT ONDER GEMODIFICEERDE ATMOSFEER (MAP) ..... | 46        |
| 4.2.1    | <i>Kwaliteitskenmerken: OVQ-score, cellekkage, microbiële contaminatie en respiratiesnelheid</i> .                                                                     | 46        |
| 4.2.2    | <i>Fytochemische componenten: pigmenten, vitamine C en suikers</i> .....                                                                                               | 51        |
| <b>5</b> | <b>DISCUSSIE</b> .....                                                                                                                                                 | <b>55</b> |
| 5.1      | EXPERIMENT 1: INVLOED VAN LICHTKWALITEIT EN PLANTDICHTHEID OP HET VOORKOMEN VAN RAND .....                                                                             | 55        |
| 5.1.1    | <i>Planteigenschappen en rand</i> .....                                                                                                                                | 55        |
| 5.1.2    | <i>Pigmenten en nitraten</i> .....                                                                                                                                     | 56        |
| 5.2      | EXPERIMENT 2: INVLOED VAN LICHTKWALITEIT EN BEWAARTEMPERATUUR OP DE KWALITEIT EN HOUDBAARHEID VAN<br>VERSNEDEN SLA, VERPAKT ONDER GEMODIFICEERDE ATMOSFEER (MAP) ..... | 56        |
| 5.2.1    | <i>Invloed van verrood licht op kwaliteit en houdbaarheid</i> .....                                                                                                    | 56        |
| 5.2.2    | <i>Invloed van bewaartemperatuur op kwaliteit en houdbaarheid</i> .....                                                                                                | 58        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIE</b> .....                                                                                                                                                 | <b>60</b> |
| <b>7</b> | <b>REFERENTIES</b> .....                                                                                                                                               | <b>61</b> |

## Abstract

Vertical farms vormen met hun gecontroleerde omgeving en artificiële belichting een ideale setting waarin groei, ontwikkeling, kwaliteit en houdbaarheid van planten aangestuurd kunnen worden. In het kader van deze masterthesis werd onderzocht hoe, enerzijds verrood licht en plantdensiteit het voorkomen van rand beïnvloeden en, anderzijds, hoe verrood licht en bewaartemperatuur een impact uitoefenen op de houdbaarheid en kwaliteit van versneden botersla, verpakt in gemodificeerde atmosfeer. Uit het eerste experiment bleek dat het toedienen van verrood licht het voorkomen en de ernst van rand deed toenemen en dat het verhogen van de plantdensiteit geen impact had. Daarnaast werd aangetoond dat het pigmentgehalte daalde en planteigenschappen, zoals drooggewicht en bladoppervlakte, toenamen wanneer sla verrood licht kreeg. Het nitraatgehalte werd noch door verrood licht, noch door plantdensiteit beïnvloed. De toename van rand wanneer planten verrood licht kregen, is mogelijks te wijten aan een snellere groei waardoor de calciumaanvoer naar de bladranden niet kan volgen en de stevigheid van de cellen afneemt. In het tweede experiment werd aangetoond dat de houdbaarheid, bepaald op basis van de respiratiesnelheid en de microbiële contaminatie, verminderde wanneer verrood licht werd toegediend. Verrood licht zorgde echter voor een stijging van de organoleptische kwaliteit en het suikergehalte. Het pigmentgehalte, de cellekkage en het vitamine C-gehalte werden niet significant beïnvloed door verrood licht of bewaartemperatuur. Het verhogen van de bewaartemperatuur van 4°C naar 7°C deed zowel de kwaliteit als de houdbaarheid afnemen. Mogelijks leidt het hogere suikergehalte door verrood licht tot een hogere microbiële besmetting en respiratiesnelheid, waardoor de houdbaarheid afneemt.

# 1 INLEIDING

De sterk toenemende wereldbevolking gaat gepaard met een stijgende voedselvraag, en niet enkel de vraag stijgt. Ook de verwachtingen van de consument in termen van hoogwaardige, kwalitatieve producten nemen toe. Echter, onze planeet heeft haar grenzen en steeds vaker speelt klimaatverandering een destructieve rol in de voedselproductie.

Vertical farming is een nieuwe, hoogtechnologische vorm van landbouw, waarbij grote hoeveelheden kunnen geproduceerd worden op een kleine oppervlakte. Deze teelten vinden plaats in een gecontroleerde omgeving, waar temperatuur, licht en relatieve vochtigheid nauwkeurig worden gecontroleerd. Productie is dan niet langer onderhevig aan externe klimaatsfactoren en kan jaarrond plaatsvinden. Ook oogstverliezen door ziekten en plagen worden sterk gereduceerd, waardoor gewasbeschermingsmiddelen minder gebruikt worden en de kwaliteit van het product toeneemt. De efficiëntie van hulpbronnen wordt eveneens aangehaald als voordeel van dit productiesysteem.

Aangezien gewassen in een vertical farm afgeschermd zijn van natuurlijk zonlicht, is het noodzakelijk om artificieel licht toe te dienen. Aan de hand van lichtintensiteit, samenstelling van het lightspectrum en belichtingsduur kan ingespeeld worden op fysiologische processen om zo groei, ontwikkeling en samenstelling van planten te sturen. Dit is een interessant gegeven om de kwaliteit en houdbaarheid van gewassen te verbeteren en de efficiëntie van het groeiproces te maximaliseren.

Vaak wordt een combinatie van rood en blauw licht toegepast in commerciële teeltsystemen. Hierbij zorgt rood licht voor een toename in fotosynthese en dus groei. Blauw licht zorgt daarentegen voor de accumulatie van bioactieve componenten. De effecten van rood en blauw licht op groei en ontwikkeling werden al veelvuldig onderzocht voor een brede waaier aan gewassen. Meer en meer wordt ook de invloed van andere golflengtes bestudeerd om teelten onder artificiële belichting te optimaliseren. In dit thesisonderzoek werd gekeken naar effecten van verrood licht.

Momenteel worden voornamelijk kruidachtige planten en bladgroenten geteeld in vertical farms omwille van hun klein formaat en snelle teeltcyclus. Voor bladgroenten, zoals botersla, wordt echter bij een te snelle groei een gebreksverschijnsel waargenomen, genaamd rand, waarbij de bladranden bruin kleuren en verwelken. Dit kan voor grote oogstverliezen en vermindering van de productkwaliteit zorgen. Daarom werd in deze thesis onderzocht in welke mate verrood licht en plantdichtheid invloed hadden op het voorkomen van rand. Hierbij werd ook gekeken naar potentiële effecten op het gewicht, de bladoppervlakte en de hoeveelheid nitraten, een criterium dat bij bladgroenten belangrijk is.

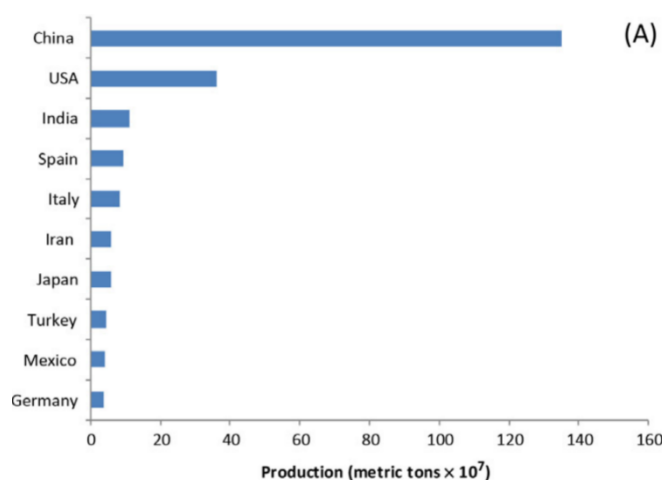
Zoals eerder aangehaald, nemen de kwaliteitseisen van consumenten toe. Zo wordt vaak veel belang gehecht aan de visuele kwaliteit. Daarnaast verwacht de consument ook nutritioneel kwalitatieve voeding. Bladgroenten bevatten belangrijke vitaminen en sporenelementen. Een voldoende inname van deze stoffen draagt bij tot een gezonde levensstijl en zou het risico op hedendaagse gezondheidsproblemen verlagen. Het lightspectrum van teelten onder artificiële belichting zou de kwaliteit van gewassen kunnen verbeteren en daarmee een langere houdbaarheid garanderen. In een tweede experiment werd daarom de invloed van verrood licht en bewaar temperatuur op de naoogstkwaliteit en houdbaarheid van botersla onderzocht. Om dit experiment in een zo realistisch mogelijke setting te volbrengen, werd besloten om de sla na de oogst te versnijden en te verpakken onder gemodificeerde atmosfeer, wat vaak in praktijk wordt gedaan voor *ready-to-eat* groenten. Componenten als suiker en pigmenten werden geanalyseerd. Daarnaast werden organoleptische beoordelingen uitgevoerd om een beeld te krijgen op de consumentenperceptie. Ook microbiële contaminatie werd nagegaan, aangezien dit de houdbaarheid kan beïnvloeden.

## 2 LITERATUURSTUDIE

### 2.1 Sla (*Lactuca sativa* L.) en de situering van de slateelt in Vlaanderen

*Lactuca sativa* L., beter bekend als sla, behoort tot de familie van de Asteraceae en wordt beschouwd als de belangrijkste bladgroente. Er wordt verondersteld dat deze bladgroente Zuidwest-Azië als oorsprong heeft en gedomesticeerd werd in mediterrane gebied. Sla wordt onderverdeeld in verschillende types, die gebaseerd zijn op morfologische verschillen. In de volksmond zijn deze types gekend onder de naam botersla (kropsla), ijsbergsla, bindsla, snijsla, stengelsla en Latijnse sla (Noumedem et al., 2017).

Vandaag de dag wordt sla wereldwijd geproduceerd en geconsumeerd omwille van zijn nutritionele waarde en medicinale belang (Kim et al., 2016; Noumedem et al., 2017). Op wereldvlak is China de grootste slaproducent met een productie van 13,5 miljoen ton in 2014, gevolgd door de VS (Figuur 1). In Europa is Spanje het land met de grootste productie met zo een 904.300 ton in 2014 (Noumedem et al., 2017). België produceerde in 2019 zo een 40.000 ton sla (Fruit Logistica, 2020). Volgens Logistica (2020) kan met dergelijke waarde België als een prominente slaproducent beschouwd worden binnen de Europese Unie.



Figuur 1: De tien grootste slaproducenten (Noumedem et al., 2017).

Hoewel hierboven vermeld staat dat sla wereldwijd geteeld wordt omwille van zijn nutritionele waarde, kan er niet gezegd worden dat sla nutritioneel hoogwaardig is. Met andere woorden, *Lactuca sativa* L. heeft een relatief lage nutritionele waarde per eenheid (Agüero et al., 2008; Kim et al., 2016; Martínez-Ispizua et al., 2022). Enerzijds bevat sla een hoog gehalte aan vezels, folaat, carotenoïden, fenolen en antioxidanten. Ook mineralen (zoals kalium, calcium, zink, ijzer, fosfor, magnesium en mangaan) en vitaminen A, C en K zijn van een opmerkelijk niveau in sla (Agüero et al., 2008; Camejo et al., 2020; Kim et al., 2016). Anderzijds heeft sla een hoog watergehalte en het is voornamelijk hierdoor dat deze bladgroente net niet nutritioneel hoogwaardig is (Agüero et al., 2008; Kim et al., 2016). Een algemene samenstelling van sla is terug te vinden in Tabel 1. Tot slot is er tussen variëteiten ook verschil op vlak van nutritionele inhoud. Zo zou rode sla bijvoorbeeld een lagere carotenoïdeninhoud bevatten dan groene sla (Kim et al., 2016).

*Tabel 1: Algemene samenstelling van een slaplant (Noumedem et al., 2017).*

| Component    | Hoeveelheid in een plant (%) |
|--------------|------------------------------|
| Water        | 96                           |
| Proteïnen    | 1,4                          |
| Koolhydraten | 2,2                          |
| Vezel        | 1,1                          |
| Vet          | 0,2                          |
| As           | 1,2                          |

In vergelijking met andere groenten scoort sla lager op vezelgehalte. In [Tabel 2](#) wordt het vezelgehalte van enkele groenten (o.a. van sla) weergegeven (Vincente et al., 2014). In het onderzoek van Colonna et al. (2016) bleek dat groene sla geen significante verschillen kende met spinazie op vlak van drogestofgehalte, proteïnegehalte, fosfor-, kalium- en calciumgehalte. Het magnesiumgehalte en het totale ascorbinezuurgehalte waren daarentegen significant lager in de groene sla. In vergelijking met tomaat, is het magnesium- en kaliumgehalte van sla abundanter (Colonna et al., 2016; Erba et al., 2013).

*Tabel 2: Vezelgehalte (%) van enkele groenten ter vergelijking met sla (Vincente et al., 2014).*

| Groente  | Vezelgehalte (%) |
|----------|------------------|
| Broccoli | 2,6              |
| Sla      | 2,1              |
| Spinazie | 2,2              |
| Tomaat   | 1,2              |
| Wortel   | 2,8              |

Dankzij haar klein formaat en korte productiecycclus is sla uitermate geschikt voor teelt in een vertical farm. Vandaag de dag wordt slateelt in vertical farms echter weinig toegepast. Het zijn eerder conventionele teeltsystemen die de voorkeur genieten. Zo kan sla geteeld worden in volle grond, al dan niet beschermd door glas of plastic tunnels. Daarnaast kan ook voor een bodemloos teeltsysteem, zoals *hydroponics*, *aeroponics* en *aquaponics* (zie [Vertical farming](#)), gekozen worden (Thomas et al., 2021).

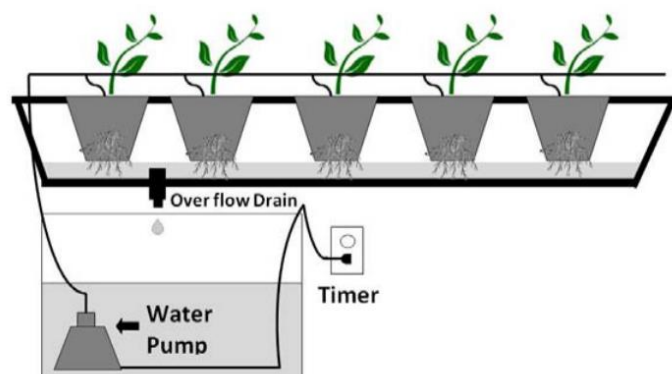
Het Belgische sla-areaal bedroeg 975 ha in 2013, waarvan 235 ha in openlucht. De overige 740 ha was beschut. In 2022 bedroeg het openluchtareaal slechts 200 ha en het beschutte areaal 498 ha. Over de jaren heen is het teeltareaal van sla in België dus afgenomen (VLAM, 2023). Het grootste aandeel is terug te vinden in Vlaanderen (Statbel, 2022). Hydrocultuur vertegenwoordigt 61% van de Belgische slateelt (Vandenbogaerde, 2021).

## 2.2 Vertical farming

Vertical farming wordt vaak door elkaar gebruikt met termen als *Plant Factory* (PF) of *Controlled Environment Agriculture* (CEA) (Alrajhi et al., 2023). Het voornaamste doel van verticale teelt is om een grotere opbrengst te behalen op een kleiner landoppervlak (Al-Kodmany, 2018). Enerzijds wordt een grotere opbrengst behaald door de planten te telen in een gecontroleerde omgeving (temperatuur, relatieve vochtigheid (RV), CO<sub>2</sub>, licht) waar een welbepaalde hoeveelheid water en nutriënten wordt toegediend, die hergebruikt kunnen worden (Birkby, 2016; van Delden et al., 2021). Anderzijds wordt de vermindering van landgebruik gerealiseerd door de planten te telen in meerdere lagen (Birkby, 2016).

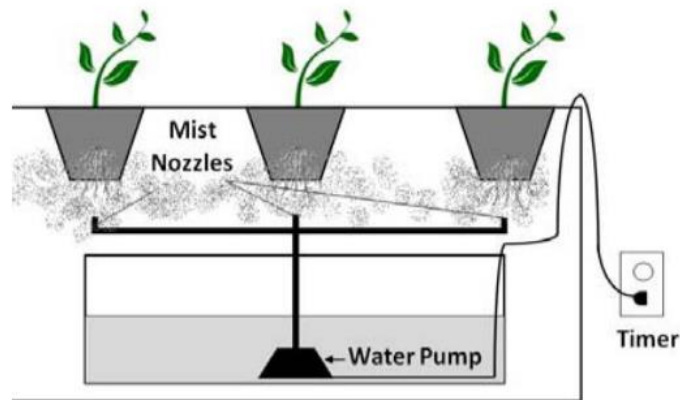
Volgens Lubna et al. (2022) zijn er verschillende types van verticale teeltsystemen. Zo kan er al dan niet op meerdere verdiepen geteeld worden. Ook opgehangen goten worden als vertical farming geclassificeerd. Naast deze types is er ook de mogelijkheid om een vertical farm op te richten in (scheeps)containers (Birkby, 2016).

De watergift in deze systemen gebeurt vaak als fertigatie waarbij water en nutriënten als een voedingsoplossing samen aangeboden worden aan de plant. De fertigatie in bodemloze slateelt verloopt volgens één van de volgende drie teeltsystemen (met mogelijke varianten). Een eerste teeltmethode wordt *hydroponics* (Figuur 2) genoemd. Bij dit systeem zijn de wortels van de planten ondergedompeld in de voedingsoplossing, die regelmatig bijgestuurd wordt (Birkby, 2016).



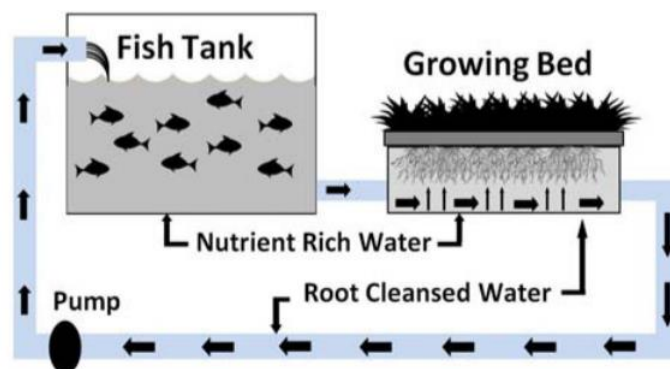
Figuur 2: Hydroponics watergiftsysteem (Birkby, 2016).

Een tweede teeltsysteem is gekend onder de naam van *aeroponics* (Figuur 3). Hierbij worden de wortels van planten geteeld in een mistige omgeving met een minimale hoeveelheid water. Aan de hand van *aeroponics* kan er tot wel 90% water bespaard worden. Bovendien zouden planten in dit teeltsysteem meer mineralen en vitaminen opnemen. Ondanks deze voordelen, zijn *aeroponics* nog niet frequent toegepast in vertical farming (Birkby, 2016).



Figuur 3: Aeroponics watergiftsysteem (Birkby, 2016).

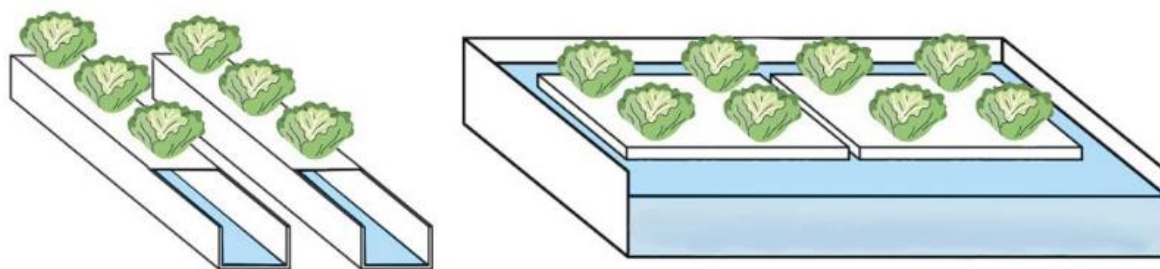
*Aquaponics* (Figuur 4) is een derde teeltmethode voor grondloos telen. Deze techniek is een variant op *hydroponics*. Naast plantenteelt worden er in *aquaponics* ook vissen gekweekt. Dit gebeurt als volgt. De vissen produceren excretieproducten die in het water terecht komen. Dit water wordt vervolgens naar de planten gestuurd die het zuiveren door de excretieproducten/nutriënten eruit op te nemen. Het gefilterde water wordt vervolgens opnieuw naar de vissen geleid en gerecycleerd (Birkby, 2016).



Figuur 4: Aquaponics watergiftsysteem (Birkby, 2016).

Binnen *hydroponics* (en *aquaponics*) kan nog een onderscheid gemaakt worden tussen enerzijds de *Deep Water Culture* (DWC)-techniek en anderzijds de *Nutrient Film Technique* (NFT). In een DWC-systeem (Figuur 5) worden de planten drijvende gehouden, meestal aan de hand van een plasticen 'vlot'. In deze opstelling zijn de plantenwortels zo goed als volledig ondergedompeld in het voedingswater (Hamza et al., 2022). Deze opstelling heeft als voordeel dat er minder kosten zijn en minder toezicht nodig is voor een goede werking van het systeem (Gillani et al., 2022). Anderzijds zijn er ook enkele nadelen aan verbonden. Zo moet het zuurstofgehalte van het water op peil gehouden worden. Het DWC-systeem is ook niet geschikt voor grote planten met een lange groeicyclus. Tot slot is het ook moeilijk om in deze opstelling een automatisatiesysteem te implementeren (Gillani et al., 2022).

In een NFT-systeem (Figuur 5) zijn de wortels niet volledig ondergedompeld in water. De planten worden opgezet in een gotensysteem waar een dunne laag voedingsoplossing door stroomt (1-2 cm). De wortels worden op die manier vochtig gehouden en de voedingsoplossing kan door de stroming voldoende belucht blijven. Voordelig aan dit systeem is ook de mogelijkheid tot automatisatie (Gillani et al., 2022; Mohammed & Sookoo, 2016). In Vlaanderen wordt dit systeem het meest toegepast bij een grondloze teelt. Het wordt hier ook vaak mobiel gotensysteem genoemd.



*Figuur 5: Voorstelling van een NFT-systeem (links) en een DWC-systeem (rechts) (Gillani et al., 2022).*

Naast water en nutriënten is licht ook cruciaal voor de groei. In een vertical farm is al het licht afkomstig van artificiële belichting. Verschillende lampen, met elk hun voor- en nadelen zijn hiervoor beschikbaar. Meer hierover is terug te vinden in [Belichtingsapparatuur in vertical farming](#).

## 2.2.1 Voordelen

Het landbouwareaal blijft afnemen (Al-Kodmany, 2018) terwijl de wereldpopulatie toeneemt. In 2050 zouden er, volgens de VN, meer dan 9 miljard mensen zijn op aarde (United Nations, 2017). Om al deze mensen te kunnen voeden, moet er dus meer voedsel geproduceerd worden op een kleinere oppervlakte. Vandaag de dag echter daalt het productiepotentieel van de landbouwbodems en is er een tekort aan grondstoffen voor voedselproductie. Vertical farming tracht een oplossing te bieden voor deze problemen en het landbouwsysteem aan te passen aan de klimaatsverandering (Matysiak et al., 2021). Enkele voordelen van verticale landbouw worden hieronder besproken. Een overzicht van de belangrijkste duurzame voordelen is terug te vinden in [Tabel 3](#).

### 2.2.1.1 Opbrengst en voedselzekerheid

Een eerste voordeel is een potentieel hoge opbrengst met een uniforme kwaliteit, en dit jaarrond dankzij de gecontroleerde omgeving waarin de planten groeien (Nguyen et al., 2021; Ohtake et al., 2018). Ze zijn namelijk niet onderhevig aan het buitenklimaat, waar omgevingsfactoren zoals temperatuur, waterbeschikbaarheid en lichtintensiteit limiterend kunnen zijn voor de voedselproductie en waar bodemgebonden ziektes de opbrengst vernielen (Alrajhi et al., 2023; Nguyen et al., 2021). Vertical farming kan dus bijdragen aan voedselzekerheid (Al-Kodmany, 2018).

### 2.2.1.2 Efficiëntie

Om gewassen te telen zijn verschillende hulpbronnen nodig zoals water, bemesting en land. Dankzij hoogtechnologische systemen die tegenwoordig beschikbaar zijn, is het mogelijk om deze hulpbronnen efficiënt te benutten (Nguyen et al., 2021).

Het waterverbruik kan dankzij hydroponische en aeroponische systemen sterk gereduceerd worden. In hydroponische systemen kan bijvoorbeeld tot 70% minder water gebruikt worden dan in conventionele landbouwsystemen (Birkby, 2016). Bovendien kan onbenut water en bemesting hergebruikt worden (Alrajhi et al., 2023; Birkby, 2016; Matysiak et al., 2021; van Delden et al., 2021). Tot slot kan in een vertical farm meer voedsel geproduceerd worden per oppervlakte-eenheid. Vertical farming is dus ook efficiënt in landgebruik (Al-Kodmany, 2018; Matysiak et al., 2021; Pennisi et al., 2019).

#### **2.2.1.3 Ecosysteemvriendelijk**

Een ander voordeel van vertical farming is de vermindering van ecosysteemvervuiling. Allereerst wordt de luchtvervuiling en CO<sub>2</sub>-uitstoot gereduceerd (Birkby, 2016). De noodzaak aan fossiele brandstoffen voor veldbewerkingen zoals wieden, ploegen en bemesten is er namelijk niet in een vertical farm. Dankzij de lokale implementatie van vertical farms, worden ook de vervuilende gassen die vrijkomen bij transport van producent naar consument sterk verminderd (Al-Kodmany, 2018).

Daarnaast wordt het gebruik van pesticiden en herbiciden gereduceerd, aangezien deze doorgaans minder of niet toegepast worden in een vertical farm (Birkby, 2016; Pennisi et al., 2019; van Delden et al., 2021). Verder kunnen nutriënten niet in de omgeving terecht komen omdat ze via gesloten watergiftsystemen worden toegediend. Op die manier kan er geen eutrofiëring optreden in open water zoals rivieren (Al-Kodmany, 2018; Matysiak et al., 2021).

#### **2.2.1.4 Gezondheid en voedselveiligheid**

Volgens Alrajhi et al. (2023) en Pennisi et al. (2019) kunnen gewassen, geteeld in een vertical farm, een hogere nutritionele waarde behalen. Dit zou er bovendien voor kunnen zorgen dat ook de houdbaarheid van de producten beter is. Daarnaast kan de nitraataccumulatie in bladgroenten vermeden worden (Pennisi et al., 2019). De nutritionele waarde van nitraat wordt verder in [Kwaliteit](#) besproken. Tot slot, zoals hierboven vermeld, worden er weinig of geen pesticiden en herbiciden toegepast in een vertical farm. Hierdoor kan de teler in een gezondere omgeving werken (Birkby, 2016).

#### **2.2.1.5 Economische voordelen**

Vertical farming heeft tot slot ook economische voordelen. Zoals eerder vermeld kan transport van een product gereduceerd worden door de vertical farm lokaal te implementeren. Op die manier worden ook de transportkosten gedrukt, die in bepaalde gevallen tot wel 60% van de kostprijs uitmaken. Lokale implementatie kan bovendien ook de lokale economie ondersteunen (Al-Kodmany, 2016). Tot slot leidt de efficiëntie van hulpbronnen (zie verder [Efficiëntie](#)) ook tot kostenefficiëntie (Alrajhi et al., 2023).

Tabel 3: Belangrijkste duurzame voordelen van verticale landbouw (vertaling van Al-Kodmany (2018)).

| Voordeel                                                                                                                     | Omgeving                                                                                                          | Sociaal                                                                                                                        | Economisch                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verminderen van transportafstanden                                                                                           | Reduceren luchtvervuiling                                                                                         | Verbeteren luchtkwaliteit<br>Verbeteren van omgevings- en menselijke gezondheid<br>Consumenten krijgen 'verser' lokaal voedsel | Reductie energieverbruik, verpakking en brandstof voor transport                                                                              |
| Verminderen waterconsumptie voor voedselproductie door gebruik van hoogtechnologische irrigatiesystemen en recyclagemethoden | Reductie van afvloeiing van oppervlaktewater van traditionele boerderijen                                         | Drinkbaar water is beschikbaar voor meer mensen                                                                                | Kostenreductie                                                                                                                                |
| Recycleren van organisch afval                                                                                               | Omgeving sparen door lagere nood aan stortplaatsen                                                                | Verbeteren van voedselkwaliteit en daarmee ook de gezondheid van de consument                                                  | Valoriseren van afval                                                                                                                         |
| Creatie van lokale werkgelegenheid                                                                                           | Minder afstand tot werk af te leggen en zo een lagere ecologische voetafdruk                                      | Creatie van een lokale gemeenschap van werkers en van een sociaal netwerk met landbouwers                                      | Economisch voordeel voor de lokale mensen                                                                                                     |
| Gereduceerd gebruik van bemesting, herbiciden en pesticiden                                                                  | Verbeteren welzijn van de omgeving                                                                                | Verbeteren van voedselkwaliteit en daarmee ook de gezondheid van de consument                                                  | Kostenreductie                                                                                                                                |
| Verbeteren productiviteit                                                                                                    | Minder ruimte nodig                                                                                               | Verminderen van overbodig en herhalend werk, tijdsbesparing voor productieve en sociaal lonende activiteiten                   | Grotere opbrengsten                                                                                                                           |
| Vermijden van oogstverliezen door overstroming, droogte, storm, te veel zon en seizoensvariatie                              | Afname omgevingsschade en opruimen/herstellen van boerderijen na schade                                           | Verbeteren van voedselzekerheid                                                                                                | Vermijden van economisch verlies                                                                                                              |
| Controle over het product ongeacht het seizoen                                                                               | Productie met betrekking tot seizoen                                                                              | Jaarrond hogere toegankelijkheid en verbeterd antwoord aan vraag van populatie                                                 | Jaarrond economische activiteit                                                                                                               |
| Gebruik van hernieuwbare energie                                                                                             | Reductie fossiele brandstoffen                                                                                    | Verbeteren luchtkwaliteit                                                                                                      | Kostenreductie                                                                                                                                |
| Natuur dicht bij de stad brengen                                                                                             | Biodiversiteit verhogen                                                                                           | Verbeteren gezondheid, stressvermindering, verbeteren van psychologisch welzijn                                                | Creatie van werkgelegenheid in de stad                                                                                                        |
| Promoten van technologie en groene industrie                                                                                 | 'Groene technologie' vermindert schade en verbetert omgevingsprestaties                                           | Aanmoedigen van hogere opleiding en bekwame werkers opleiden                                                                   | Nieuwe werkgelegenheid in volgende sectoren: ingenieurswetenschappen, biochemie, biotechnologie, bouw en onderhoud, onderzoek en ontwikkeling |
| Traditionele landbouwgebruiken verminderen                                                                                   | Behoud van natuurlijke ecologische systemen                                                                       | Gezondheid van de burger verbeteren                                                                                            | Geld sparen dat bedoeld is voor omgevingsschade                                                                                               |
| Nieuwe invulling geven aan vervallen gebouwen                                                                                | Verbeteren van de omgeving<br>Verwijderen van visueel storende elementen en verbeteren van reputatie van de buurt | Creatie van opportuniteiten voor sociale interactie                                                                            | Herleving van de economie                                                                                                                     |

## 2.2.2 Nadelen en uitdagingen

Omwille van alle opgesomde voordelen, lijkt verticale landbouw een zeer aantrekkelijke teeltwijze voor een duurzame landbouw. Toch zijn er ook nadelen en uitdagingen.

### 2.2.2.1 Kosten

Één van de grootste argumenten tegen vertical farming is de hoge kost die ermee verbonden is. Enerzijds is er een hoge investeringskost nodig om een vertical farm op te richten (Pennisi et al., 2019; van Iersel, 2017). Anderzijds zijn er ook de hoge operationele kosten die het prijskaartje van vertical farming doen toenemen (Lubna et al., 2022).

Zo kunnen de elektriciteitskosten hoog oplopen. In een vertical farm is veel elektriciteit nodig voor o.a. belichting, temperatuurs- en relatieve vochtigheidsregeling. Hierdoor kan er geargumenteerd worden dat vertical farming minder klimaatvriendelijk is (Lubna et al., 2022; Pennisi et al., 2019; van Iersel, 2017). Nochtans is het tegenwoordig mogelijk om energie uit hernieuwbare bronnen te benutten zoals wind- en zonne-energie (Alrajhi et al., 2023; Lubna et al., 2022).

Kobayashi et al. (2022) onderzocht in welke mate hernieuwbare energiebronnen in Spanje en Zweden (twee verschillende klimaten) konden voldoen aan de elektriciteitsvraag in een vertical farm. Zij maakten een onderscheid tussen een *best-case* scenario en *worst-case* scenario, naargelang de invulling van de capaciteitsdichtheid. In het beste geval kon, aan de hand van zonne-energie, ongeveer vier keer meer energie geproduceerd worden dan vereist in slateelt (455% in Spanje en 374% in Zweden). Daarnaast kon windenergie voor 125% en 180% voorzien in de elektriciteitsnoden, in Spanje en Zweden respectievelijk. Echter, in het slechtste geval, kon in Spanje slechts 76% van de energievraag gedekt worden door zonne-energie en 5% door windenergie. In Zweden was dit slechts 62% door zonne-energie, maar 8% door windenergie.

Tot slot is ook arbeid geen verwaarloosbare kost (Moghim, 2021). Bovendien moeten arbeiders goed getraind zijn en voldoende kennis hebben om in een vertical farm te kunnen werken. Deze opleiding vergt ook een investering (Lubna et al., 2022).

### 2.2.2.2 Gewaskeuze

Door deze hoge kosten is het volgens Lubna et al. (2022) onwaarschijnlijk dat de zogenaamde *staple crops* in een verticale teelt geproduceerd kunnen worden omdat het economisch gezien niet rendabel is. Daarom wordt momenteel vooral geopteerd voor bladgroenten, kruiden en fruit met een kleine omvang, snelle groeicyclus en lage energievraag (Birkby, 2016; Lubna et al., 2022). Een tweede nadeel naast de hoge kosten is dus het beperkt aantal gewassen dat in zo een systeem geteeld kan worden (Birkby, 2016).

### 2.2.2.3 Gezondheid

Hoewel vertical farming kan resulteren in een verbeterde nutritionele kwaliteit, kunnen er ook enkele nadelige gezondheidsaspecten zijn. Er is namelijk een potentieel gezondheidsrisico voor de telers doordat ze voortdurend blootgesteld worden aan hoge lichtintensiteiten. Ook voor de consument is er mogelijk een gezondheidsimpact door een gewijzigd gehalte aan fytochemische stoffen (van Delden et al., 2021). Lubna et al. (2022) stelt zelfs dat voedselveiligheid in het gedrang kan komen door een slechte waterkwaliteit, indien het gerecycleerde water niet op een correcte manier behandeld wordt.

#### 2.2.2.4 Overige uitdagingen

De toegankelijkheid van vertical farmproducten voor consumenten is een uitdaging. Zo zouden volgens van Delden et al. (2021) enkel de meest welvarende consumenten toegang hebben tot deze producten, ook wel *techno-local food* genoemd, omwille van hun hoge kostprijs.

Daarnaast moet er ook vermeld worden dat een vertical farm een zeer complex systeem is met ingewikkelde bedradings- en buizennetwerken, verwarmings- en ventilatiesystemen. Tot slot wordt ook gesteld dat communicatie tussen telers onderling en telers met wetenschappers, en het delen van data momenteel een knelpunt is in vertical farming (Lubna et al., 2022).

## 2.3 Licht

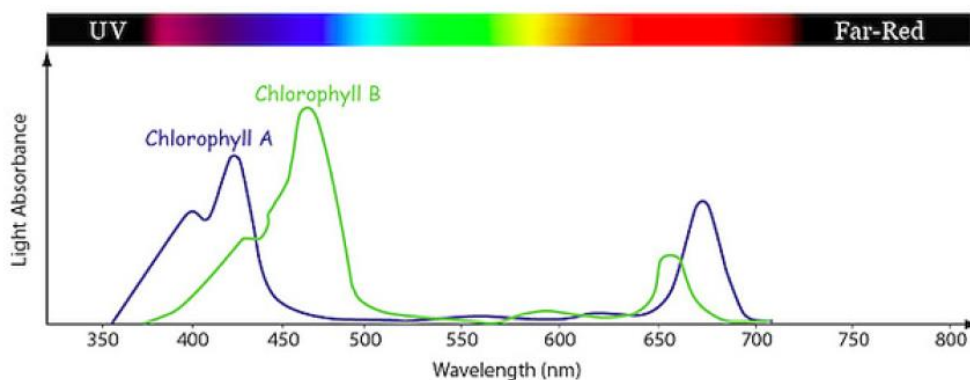
Licht is cruciaal voor planten. Via het proces van fotosynthese kunnen ze instralend licht omzetten naar chemische energie (Kami et al., 2010). Daarnaast wordt licht ook gebruikt voor sturing van groei en ontwikkeling via tal van fysiologische processen. Dit wordt fotomorfogenese genoemd (Kami et al., 2010; Kang et al., 2016; Lin et al., 2013; Matysiak et al., 2021). Verschillende eigenschappen karakteriseren licht. Runkle (2007) stelt dat er drie fundamentele dimensies zijn van licht. In dit deel worden deze dimensies besproken evenals twee specifieke lichtbehandelingen en de meest gebruikte belichtingsapparatuur in vertical farms.

### 2.3.1 Lichtkwaliteit

Een eerste dimensie van licht is de kwaliteit. De kwaliteit geeft de spectrale distributie weer. Dit is de relatieve hoeveelheid fotonen per golflengte (Runkle, 2007). Afhankelijk van de gebruikte golflengte(s) zal de belichting een andere invloed uitoefenen op de groei, ontwikkeling en fysiologische processen van de plant (Kang et al., 2016; Lin et al., 2013; Matysiak et al., 2021). Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen licht dat wel en licht dat niet fotosynthetisch actief is.

#### 2.3.1.1 Fotosynthetisch actieve straling (PAR)

Fotosynthetisch actieve straling, afgekort PAR, omvat de golflengtes tussen 400 nm en 700 nm (Runkle, 2007). Licht afkomstig uit dit golflengtegebied kan geabsorbeerd worden door fotosynthetische pigmenten zoals chlorofyl A en chlorofyl B. *Figuur 6* geeft weer in welk gebied van het spectrum bepaalde chlorofyl A en B actief zijn (Panawala, 2017). Zowel chlorofyl A als chlorofyl B absorberen voornamelijk licht uit het rode en blauwe gebied van het spectrum. Echter zal chlorofyl A meer licht absorberen dan chlorofyl B in het rode deel en het omgekeerde geldt in het blauwe deel (Dutta Gupta & Agarwal, 2017).



*Figuur 6: Lichtabsorptiespectrum van chlorofyl A en chlorofyl B (Panawala, 2017).*

Hieronder worden de belangrijkste golflengtes besproken uit het PAR-gebied met betrekking tot plantengroei en -ontwikkeling, namelijk rood en blauw, en hun impact op een plant. Deze golflengtes worden het meest onderzocht aangezien hun golflengtes het meest geabsorbeerd worden door fotosynthetische pigmenten. Groen licht, specifiek uitgezonden door *light emitting diodes* (led), wordt weinig onderzocht en toegepast omwille van de lage omzettingsefficiëntie van elektriciteit in fotonen (Nguyen et al., 2021).

### **Rood licht**

Rood licht heeft een golflengte tussen de 600 nm en 700 nm (Runkle, 2007).

#### Invloed van rood licht op morfologie van sla

Allereerst staat rood licht erom bekend om de biomassa te doen toenemen (Matysiak et al., 2021). Dit is mogelijks te wijten aan het feit dat rood licht het meest efficiënt de fotosynthese aandrijft (Dou et al., 2017; Hooks et al., 2021). Daarnaast zorgt rood licht ook voor stengelverlenging en bladvergroting (Chen et al., 2021; Nguyen et al., 2021). Echter, het toedienen van monochromatisch rood licht zou eerder tot abnormaliteiten leiden zoals atypische bladgroei en distorsie van de bladsteel (Chen et al., 2021; Ohtake et al., 2018).

Bij een lichtbehandeling met meerdere golflengtes (een breedspectrum behandeling) kan er gespeeld worden met de proportie rood. Zo zouden volgens Chen et al. (2021) de bladeren van botersla lichter worden van kleur en hoger zijn in aantal bij het verhogen van het gehalte aan rood licht.

Tot slot leidt een hogere proportie rood licht volgens Pennisi et al. (2019) tot een betere *Water Use Efficiency* (WUE). De oorzaak hiervan is de daling van de transpiratie door lagere stomatale geleidbaarheid. Deze lagere stomatale geleidbaarheid is op zijn beurt het gevolg van een kleiner aantal maar grotere stomata.

#### Invloed van rood licht op componenten van sla

Het gehalte aan vitamine C in botersla zou volgens Chen et al. (2021) toenemen bij een behandeling met monochromatisch rood licht. In een breedspectrumbehandeling heeft de proportie rood licht een impact op de synthese van enkele componenten in sla. Zo daalt de hoeveelheid chlorofyl A en B, samen met de hoeveelheid carotenoiden wanneer de proportie rood licht toeneemt. De zetmeelhoeveelheid daarentegen stijgt volgens Chen et al. (2021) bij een groter aandeel aan rood licht. Glucose en fructose kennen geen lineaire stijging of daling bij een stijgende roodproportie, maar dalen in de eerste plaats om daarna te stijgen. Hetzelfde geldt voor het vezelgehalte (Chen et al., 2021).

Ook het nitraatgehalte van botersla kan beïnvloed worden door rood licht. Indien in een breedspectrum behandeling 0% rood licht wordt toegediend, is het nitraatgehalte op zijn hoogst. De kleinste hoeveelheid nitraten zou terug te vinden zijn in een breedspectrumbehandeling met 80% rood licht. Rood licht kan namelijk via receptoren zoals fytochroom het enzym nitraatreductase activeren (Chen et al., 2021).

Daarnaast kan rood licht de hoeveelheid chlorofyl doen toenemen met als gevolg een toename in fotosynthese, iets wat andere golflengtes uit het PAR-gebied niet kunnen (Dou et al., 2017). Dit is enigszins ietwat tegenstrijdig met Chen et al. (2021), waar vermeld wordt dat de hoeveelheid chlorofyl A en B daalt met toenemende proportie rood licht. Dou et al. (2017) stelt bovendien dat rood licht het transport van koolhydraten in de plant verhindert. Doordat er minder koolhydraten van *source* naar *sink* gaan, blijven er meer koolhydraten in de bladeren aanwezig en dit remt de fotosynthese.

## **Blauw licht**

Ook blauw licht met een golflengte van 400 nm tot 500 nm is een belangrijk element van de fotosynthetisch actieve straling (Runkle, 2007).

### Invloed van blauw licht op morfologie van sla

Blauw licht heeft minder invloed op groei en ontwikkeling dan rood licht. Zo zullen planten onder blauw licht een tragere groei vertonen omdat de celdeling en -expansie verhinderd worden (Chen et al., 2021; Hooks et al., 2021). Blauw licht is daarentegen wel essentieel voor de fotomorfogenese (Alrajhi et al., 2023). Volgens Pennisi et al. (2019) zal sla onder blauw licht een *dwarfing effect* vertonen. Bovendien worden ook de bladmorfologie en de grootte en densiteit van de stomata beïnvloed (Pennisi et al., 2019). Tot slot zou volgens Chen et al. (2021) bij een verhoogde proportie blauw licht de bladkleur van botersla groener/donkerder worden.

### Invloed van blauw licht op componenten van sla

Ondanks dat planten onder een toenemende proportie blauw licht een tragere groei vertonen, zullen ze wel een grotere hoeveelheid bioactieve componenten bevatten (Kang et al., 2016; Matysiak et al., 2021).

Chlorofylsynthese wordt beïnvloed door blauw licht (Alrajhi et al., 2023; Chen et al., 2021; Matysiak et al., 2021). Indien een breedspectrumbehandeling wordt toegepast op sla, zal het gehalte aan chlorofyl toenemen bij een stijgend aandeel blauw licht (Chen et al., 2021). Hetzelfde geldt voor flavonolen (Matysiak et al., 2021) en carotenoïden (Chen et al., 2021; Hooks et al., 2021). Bovendien worden genen, verantwoordelijk voor anthocyaansynthese, gereguleerd door blauw licht waardoor het anthocyaangehalte toeneemt als het aandeel blauw licht toeneemt (Camejo et al., 2020). Ook worden er, bij toevoeging van extra blauw licht twaalf uur voor de oogst, meer vitamine C en andere *health-promoting compounds* gesynthetiseerd in paksoi (Hooks et al., 2021). Blauw licht kan dus de productkwaliteit doen toenemen. Echter, een te grote proportie blauw licht zorgt ook voor accumulatie van lichtbeschermende secundaire metabolieten, met als gevolg een negatieve impact op de productiviteit (Gómez & Jiménez, 2020).

## **Rood en blauw gecombineerd**

Er wordt gesteld dat monochromatische belichting met rood of blauw licht niet gunstig is voor de plant. Het zou namelijk leiden tot plantabnormaliteiten en vertraging van de fotosynthese (Alrajhi et al., 2023). Een combinatie van rood en blauw ledlicht lijkt daarom voordelig. Urbonavičiūtė et al. (2007) stellen bijvoorbeeld dat de combinatie van rood en blauw leidt tot gewenste effecten op groei en nutritionele kwaliteit van sla. Hun onderzoek vergeleek drie lichtbehandelingen, namelijk rood in combinatie met groen, blauw of UV-licht. De hoogste concentratie koolhydraten was terug te vinden bij een combinatie van rood en blauw licht. Alrajhi et al. (2023) stelden dat meerdere onderzoeken concludeerden dat bij een combinatie van rood en blauw licht de hoogste chlorofylinhoud en fotosynthesesnelheid werden bekomen. De combinatie van rood en blauw kan echter leiden tot planten met een paars tot grijs uitzicht, wat de visuele beoordeling kan beïnvloeden en bemoeilijken (Nguyen et al., 2021).

### 2.3.1.2 Andere golflengtes

Naast het PAR-gebied zijn er ook andere golflengtes die mogelijk een invloed kunnen uitoefenen op de plant. Ultraviolet en verrood zijn er zo twee. Deze worden hieronder besproken.

#### Ultraviolet (UV)

Binnen het UV-lichtspectrum kan er nog een onderscheid gemaakt worden tussen UV-A (320-400 nm), UV-B (280-320 nm) en UV-C (100-280 nm) (Hooks et al., 2021).

De golflengtes van UV-A-licht worden niet door chlorofyl geabsorbeerd maar door fototropinen en cryptochromen (Hooks et al., 2021). UV-A heeft in verschillende onderzoeken geleid tot toename van bepaalde componenten. Zo vermeldt Hooks et al. (2021) dat een toename in pigmenten en antioxidanten werd aangetoond bij microgroenten en een toename van het fenolgehalte bij broccolischeuten onder invloed van UV-A.

UV-B-straling staat erom bekend een gunstig effect te hebben op de productie van secundaire metabolieten. De straling van UV-B-licht activeert namelijk de UV-B-receptor UVR8. Hierdoor wordt een stressrespons ontwikkeld die defensiemechanismen activeert en de productie van secundaire metabolieten bevordert (Hooks et al., 2021). Secundaire metabolieten, zoals flavonoïden, kunnen vervolgens in de plant fungeren als zonnenscherm of ter verdediging tegen plantetende insecten (Alrajhi et al., 2023).

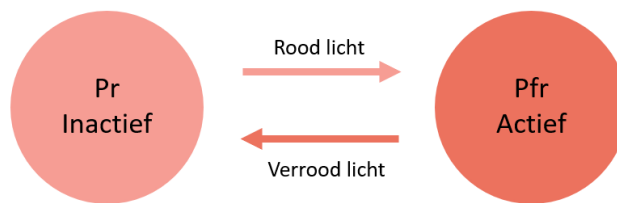
UV-C-licht bereikt nauwelijks het aardoppervlak omdat het merendeel door de ozon geabsorbeerd wordt. Indien UV-C-licht het bladoppervlak zou bereiken, kan dit, door de grote ionisatie-energie, leiden tot de inactivatie van nucleïnezuren met biologische schade tot gevolg (Hooks et al., 2021).

#### Verrood (FR)

Licht uit het verrood gebied bezit een golflengte tussen de 700 en 800 nm (Hooks et al., 2021). Allereerst beïnvloedt verrood licht de plantarchitectuur (Alrajhi et al., 2023). Planten onder verrood licht kunnen bijvoorbeeld een verlengde stengel bezitten (Alrajhi et al., 2023; Hooks et al., 2021). Dit is echter niet gewenst voor de commercialisatie van sla. Anderzijds heeft verrood licht een positief effect op de fotosynthese met een groeiverbetering en productiestijging tot gevolg (Alrajhi et al., 2023). Nutritioneel gezien kan een toevoeging van 21% verrood leiden tot een verhoogd suikergehalte in botersla, wat de organoleptische eigenschappen en naaogstkwiteit ten goede komen. Bovendien zorgt dit 21% verroodsupplement voor een verhoogde *Light Use Efficiency* (LUE), echter ook een ongewenste afname van bladpigmentatie (Van de Velde et al., 2023).

#### Rood/verrood (R/FR)-verhouding

Rood en verrood licht beïnvloeden het lichtgevoelige pigment fytochroom, aanwezig in planten. Dit pigment komt voor onder twee vormen, enerzijds de actieve (Pfr) vorm die verrood licht absorbeert en anderzijds de inactieve (Pr) vorm die rood licht absorbeert. Wanneer de inactieve vorm rood licht absorbeert wordt deze omgezet in de actieve vorm en omgekeerd, wanneer de actieve vorm verrood licht absorbeert wordt deze omgezet in de inactieve vorm (Demotes-Mainard et al., 2016; Van de Velde et al., 2023). *Figuur 7* geeft dit proces schematisch weer. De actieve vorm wordt naar de celkern getransporteerd en activeert daar verschillende mechanismen die tot responsen leiden zoals in vorige alinea beschreven (Demotes-Mainard et al., 2016).



*Figuur 7: Schematische weergave van fytochroomomzetting.*

De R/FR-verhouding is een interessant gegeven om de plantontwikkeling te sturen. Door een lage R/FR-ratio toe te dienen worden zowel stengelverlenging, bladvergroting en bloei gestimuleerd. Stengelvertakking wordt daarentegen door een hoge R/FR-verhouding bevorderd (Demotes-Mainard et al., 2016).

### 2.3.2 Lichtkwantiteit

Een tweede dimensie van licht is de kwantiteit. Deze parameter bepaalt hoeveel fotonen, dit zijn lichtpartikels, de plant kunnen aanzetten tot fotosynthese. De kwantiteit wordt gemeten als lichtintensiteit. Deze geeft de ogenblikkelijke hoeveelheid licht weer die de plant bereikt. Verschillende eenheden voor lichtkwantiteit zijn  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  of  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  (Runkle, 2007).

Vaak wordt in wetenschappelijke literatuur naar lichtkwantiteit verwezen met de term PPFD. PPFD staat voor *Photosynthetic Photon Flux Density* en wordt uitgedrukt in  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Het verhogen van de PPFD kan leiden tot een grotere biomassa (Gómez & Jiménez, 2020; Jin et al., 2023; Min et al., 2021). Ook zou volgens Camejo et al. (2020) een hoge PPFD zorgen voor een betere bladtextuur bij groene sla en een hoger gehalte aan vitamine C en anthocyanen bij rode sla. Tot slot zou ook de houdbaarheid en visuele kwaliteit van de sla in de hand gewerkt worden door een hoge fotosynthetische fotonflux (Jin et al., 2023; Min et al., 2021). Enkele nadelen verbonden aan een hoge PPFD zijn de hoge kosten en de mogelijke biologische schade door de foto-oxidatieve stressrespons van de plant (Gómez & Jiménez, 2020).

Een manier om zo efficiënt mogelijk om te gaan met licht, is door de PPFD gradueel te verhogen tijdens de teelt. Wanneer de slaplanten jong zijn en een klein bladoppervlak hebben, kunnen ze minder licht interceperen. Door dan een lage PPFD toe te dienen, zal er minder licht verloren gaan. Naarmate de bladoppervlakte toeneemt, kan de plant meer licht opnemen en kan de PPFD dus verhoogd worden. De hoeveelheid aangeboden licht is dus in functie van de uitgestrektheid van het bladoppervlak (Jin et al., 2023).

### 2.3.3 Fotoperiode

De fotoperiode, de derde dimensie van licht, geeft weer hoeveel uren een plant wordt blootgesteld aan continu licht over een periode van 24 uur (Runkle, 2007).

Planten kunnen aan de hand van een interne klok de daglengte bepalen en op die manier fotoperiodische responsen vertonen (circadiaanse klok). Op basis van verschillende bloei-inductiepatronen bij planten kan een onderscheid gemaakt worden tussen drie groepen. De eerste groep bestaat uit de 'lange dag planten' (LDP). Deze zullen bloei vertonen wanneer de daglengte de kritische daglengte (KDL) overschrijdt. Deze KDL is sterk speciesafhankelijk. De 'korte dag planten' (KDP) vormen de tweede groep en zullen bij een daglengte korter dan de KDL reageren en bloeien. Tot slot, de derde groep, de

dagneutrale planten, zij reageren niet op de fotoperiode (Jackson, 2009). *Lactuca sativa* L. is een LDP (Alconero, 1988; Waycott et al., 1995), met uitzondering van sommige cultivars die dagneutraal zijn (Alconero, 1988).

Daarbovenop kan nog eens het onderscheid gemaakt worden tussen planten die obligaat en facultatief reageren op de daglengte. Planten die alleen kunnen bloeien als de inducerende fotoperiode aanwezig is, staan bekend als obligaat. Als bloei optreedt zonder de vereiste fotoperiode, worden ze facultatief genoemd (Jackson, 2009).

De fotoperiode staat bekend om zijn invloed op generatieve, alsook vegetatieve groei. Zo zou een langere fotoperiode leiden tot een toename in biomassa (Kang et al., 2013). Ook bepaalde secundaire metabolieten, zoals fenolen, zouden toenemen door het verlengen van de fotoperiode van 6 tot 12 uur (Ali et al., 2009).

### 2.3.4 End of Production (EoP)- en naoogstlichtbehandelingen

Om de kwaliteit van sla te verbeteren zonder de opbrengst negatief te beïnvloeden, kan er voor een *End of Production* (EoP)-lichtbehandeling gekozen worden. De toediening van UV-A, UV-B of blauw licht aan het einde van de groeiperiode kan de hoeveelheid secundaire metabolieten doen toenemen. Deze metabolieten worden gevormd als reactie op de foto-oxidatieve stress die de planten ondergaan door deze straling en worden beschouwd als kwaliteitsverbeteraars (Gómez & Jiménez, 2020). Gómez & Jiménez (2020) toonden daarentegen aan voor rode sla dat een EoP-behandeling met UV-A-licht resulteerde in een gelijkaardige kwaliteit dan planten zonder speciale EoP-behandeling. Het toedienen van blauw licht of een hogere lichtintensiteit naar het einde van de groei, bevorderde wel het anthocyaangehalte en het totale antioxidantgehalte. Het gehalte aan fenolen en carotenoiden werd nauwelijks beïnvloed door EoP-behandelingen.

In tegenstelling tot een speciale lichtbehandeling voor de oogst, kan er ook voor een naoogstlichtbehandeling geopteerd worden. Naoogstbehandelingen kunnen enerzijds de houdbaarheid van het product verlengen door behoud van nutritionele en visuele kwaliteit (Min et al., 2021). Zo kunnen planten met UV-C-licht behandeld worden om microbiële groei te onderdrukken (Allende & Artés, 2003). Ook periodieke belichting (bijvoorbeeld 2h licht/2h donker) met zichtbaar licht is mogelijk (Charles et al., 2018). Anderzijds zou belichting na de oogst kunnen leiden tot het openen van de stomata waardoor meer water verloren gaat. Hierdoor daalt het gewicht van het product, wat ongewenst is en bovendien gaat de textuur en het visuele aspect achteruit (Min et al., 2021). Kozuki et al. (2015) stelt echter dat een korte naoogstbehandeling van sla met nabij-infraroodlicht zou leiden tot het sluiten van stomata en dus reductie in waterverlies.

### 2.3.5 Belichtingsapparatuur in vertical farming

Waar in serreteelt voornamelijk fluorescentielampen (TL-lampen), hogedruk natriumlampen (HPS) en metaalhalidelampen (MHL) worden gebruikt, wordt in vertical farming meestal ledverlichting toegepast (Dutta Gupta & Agarwal, 2017).

Het gebruik van ledlampen kent verschillende voordelen. Allereerst kan dit type belichting wel in de nabijheid van het gewas geplaatst worden in tegenstelling tot de conventionele lichtbronnen (Matysiak et al., 2021). Dit is mogelijk dankzij de lage warmteproductie (tot 95% minder warmteproductie) van deze lampen (Camejo et al., 2020; Chen et al., 2021; Dutta Gupta & Agarwal, 2017; Pennisi et al., 2019). Bovendien hebben ze een hoge elektrische efficiëntie (tot 80% minder energieverbruik), dankzij hun hoge energieconversie, en een hoge fotosynthetische doeltreffendheid (Camejo et al., 2020; Pennisi et al., 2019). Door deze hogere fotosynthesesnelheden kan er een hogere opbrengst behaald worden (Pennisi et al., 2019). Tot slot zijn ledlampen klein waardoor ze weinig ruimte innemen en hebben ze een lange levensduur, wat ook milieuvriendelijk is (Camejo et al., 2020; Matysiak et al., 2021; Ohtake et al., 2018).

In tegenstelling tot conventionele lichtbronnen zijn ledlampen vooral monochromatisch. De samenstelling van de led bepaalt welke golflengte zal worden uitgezonden. Door combinatie van verschillende leds kan een specifiek spectrum samengesteld worden. De lichtintensiteit van ledlampen kan ook eenvoudig geregeld worden via de elektrische stroom. Omdat zowel de lichtkwaliteit als de lichtintensiteit zo goed geregeld kunnen worden, kan de groei en ontwikkeling van planten nauw gestuurd worden (Dutta Gupta & Agarwal, 2017).

## 2.4 Kwaliteit

In [Licht](#) werd duidelijk dat verschillende componenten van sla beïnvloed worden door het lichtspectrum. Hoe deze componenten bijdragen tot de nutritionele en organoleptische kwaliteit van sla, wordt in dit deel besproken.

### 2.4.1 Nutritionele kwaliteit

In [Sla \(\*Lactuca sativa\* L.\) en de situering van de slateelt in Vlaanderen](#) werd kort de nutritionele samenstelling van sla toegelicht. In het volgende deel wordt dieper ingegaan op de nutritionele voordelen van deze componenten.

#### 2.4.1.1 Suikers en vezels

*Lactuca sativa* L. bevat goed verteerbare suikers (Kim et al., 2016). De meest voorkomende suiker in sla is glucose (Chadwick et al., 2016). Zoals eerder besproken in [Sla \(\*Lactuca sativa\* L.\) en de situering van de slateelt in Vlaanderen](#), bevat sla 96% water en slechts 2,2% koolhydraten (Noumedem et al., 2017). Hierdoor heeft sla een lage energetische waarde (Kim et al., 2016). Daarnaast heeft sla, omwille van haar vezelgehalte, meerdere gezondheidsvoordelen (Kim et al., 2016).

#### 2.4.1.2 Vitaminen

Vitamine C staat bekend voor zijn antioxidantende functie (Camejo et al., 2020; Martínez-Ispizua et al., 2022; Min et al., 2021) en is essentieel voor de werking van het menselijke metabolisme en immuunsysteem (Camejo et al., 2020; Kim et al., 2016). Vitamine C omvat twee componenten, namelijk ascorbinezuur en dehydroascorbinezuur (Kim et al., 2016; Min et al., 2021). In planten wordt voornamelijk ascorbinezuur teruggevonden (Kim et al., 2016).

De dagelijkse inname van vitamine C is van groot belang aangezien het door zijn goede wateroplosbaarheid snel uit het lichaam wordt afgevoerd. Het vitamine C-gehalte van botersla zou tussen de 28 à 92 µg/g versgewicht gelegen zijn. Hiermee scoort groene botersla minder goed dan andere bladgroenten zoals spinazie, maar beter dan rode sla (Kim et al., 2016). Ook andere onderzoeken tonen aan dat het vitamine C-gehalte tussen cultivars verschilt (Colonna et al., 2016; Llorach et al., 2008; Medina-Lozano et al., 2021).

Naast vitamine C is sla ook rijk aan vitamine E en folaat (vitamine B9). Bovendien bevat sla carotenoïden die als precursor kunnen dienen voor vitamine A. Deze vitamine is belangrijk voor het visueel vermogen, de reproductie, de embryogene ontwikkeling en de immuniteit (Kim et al., 2016).

#### 2.4.1.3 Carotenoïden

Carotenoïden zijn van belang voor de menselijke gezondheid. Ze zijn terug te vinden in geeloranje fruit en groenten, groenten met donkergroene bladeren en in dierlijke producten zoals melk (en boter), eieren en zeevruchten (Kim et al., 2016; Rodriguez-Concepcion et al., 2018). Zoals eerder vermeld zijn sommige carotenoïden een precursor voor vitamine A.

#### 2.4.1.4 Polyfenolen

Polyfenolen zijn secundaire plantmetabolieten verantwoordelijk voor het plantafweersysteem (Kim et al., 2016). Ze worden vooral teruggevonden in fruit, groenten, granen, koffie en thee (Abbas et al., 2017). Voor de menselijke gezondheid zijn ze echter niet essentieel. Ze kunnen echter wel de gezondheid op lange termijn verbeteren (Williamson, 2017). Ook beïnvloeden ze de sensorische eigenschappen van plantaardig voedsel (Kim et al., 2016).

De groep van polyfenolen omvat flavonoïden, tanninen en fenolische zuren, samen met hun chemische en gepolymeriseerde derivaten (Williamson, 2017). Polyfenolen hebben antioxidantende eigenschappen, mogelijks groter dan die van vitamine C en vitamine E (Abbas et al., 2017; Kim et al., 2016; Williamson, 2017).

Indien slasoorten vergeleken worden op basis van hun totaal fenolengehalte, kan gesteld worden dat rode sla meer fenolen bevat dan groene. Ook tussen verschillende groene slavariëteiten is er een verschil. Zo bevat botersla meer fenolen dan ijsbergsla of romeinse (groene) sla en minder dan pluksla (Kim et al., 2016).

#### 2.4.1.5 Nitraten

Nitraten en hun metabolieten, zoals nitrieten, stikstofmonoxide (NO) en nitrosamines, zijn schadelijk voor de menselijke gezondheid. Nitrieten zijn gevaarlijk omdat ze binden met hemoglobine en op die manier het zuurstoftransport in het lichaam verhinderen. Nitrosamines, op hun beurt, zijn schadelijk wanneer ze omgevormd worden tot secundaire amines en zo het risico op gastro-intestinale kanker verhogen (Camejo et al., 2020; Martínez-Ispizua et al., 2022). In de Europese wetgeving zijn daarom normen vastgesteld voor de hoeveelheid nitraten die groenten mogen bevatten (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), 2010).

Het nitraatgehalte in bladgroenten wordt sterk bepaald door de lichtintensiteit (Martínez-Ispizua et al., 2022). Cantliffe (1972) toonde aan dat onder lage lichtintensiteit het percentage aan nitraat in spinaziebladeren hoger was dan onder hoge lichtintensiteit.

#### 2.4.1.6 Mineralen

Sla is rijk aan kalium (K). Zo kan 100 g sla vier tot acht percent van de aanbevolen dagelijkse hoeveelheid kalium (4,7 g/dag) bevatten, afhankelijk van de soort. Dergelijk K-gehalte is vergelijkbaar met dat van spinazie. Kalium doet de bloeddruk dalen en speelt een rol in de elektrolyten- en waterhuishouding. Daarnaast is sla arm aan natrium (Na). Beperkte inname van natrium wordt aangeraden aangezien het de bloeddruk, in tegenstelling tot kalium, doet stijgen. (Kim et al., 2016). Net als kalium is het gehalte aan calcium van sla te vergelijken met dat van spinazie (1 mg/g versgewicht), met verschillen tussen soorten.

Twee belangrijke mineralen en tevens spoorelementen zijn zink (Zn) en ijzer (Fe). Zink speelt een rol in de basisfuncties van de cel, in de immuniteit en als antioxidant. Ijzer daarentegen is van belang voor de vorming van hemoglobine en het hiermee gepaard gaande zuurstoftransport. Het ijzergehalte in botersla zou 5 µg/g versgewicht bedragen. Tussen verschillende soorten treden er wel variaties op waardoor over het algemeen voor sla de ijzerinhoud tussen 3,0 en 5,6 µg/g versgewicht is gelegen. Indien dit vergeleken wordt met het ijzergehalte van spinazie die 27,1 µg/g versgewicht bedraagt, kan er gesteld worden dat sla arm is aan ijzer. Toch kan 100 g verse sla voldoen aan 15% van de aangeraden dagelijkse inname. Echter, planten zijn een bron van niet-heemijzer wat minder biobeschikbaar is dan heemijzer dat in dierlijke producten terug te vinden is (Kim et al., 2016).

## 2.4.2 Organoleptische kwaliteit

Bij het bepalen van de organoleptische kwaliteit worden parameters zoals kleur, textuur, smaak en geur beoordeeld (Barrett et al., 2010; Min et al., 2021). Verschillende beoordelingsmethoden kunnen hiervoor toegepast worden. Wanneer een analytische, objectieve beoordeling van de sensorische eigenschappen gewenst is, gebeurt de evaluatie meestal via een getraind panel (Ares & Varela, 2017; Djekic et al., 2021). Hierbij wordt de werkelijke test voorafgegaan door een trainingsfase. Belangrijk bij dergelijke beoordeling is dat de panelleden voldoende trainingsuren achter de rug hebben. Daarnaast is hun ervaring en woordenschat van belang voor een goede beschrijving (Djekic et al., 2021).

Naast een getraind panel, kan ook een ongetraind consumentenpanel het product beoordelen. Dit wordt een hedonistische test genoemd en, in tegenstelling tot de analytische test, worden hier vooral consumenten aanvaarding en -voorkeur onderzocht (Ares & Varela, 2017; Djekic et al., 2021). Deze test vereist dat de participanten het onderzochte product regelmatig consumeren om aan de beoordeling te kunnen deelnemen. (Ares & Varela, 2017).

Bij het samenstellen van een panel moeten verschillende parameters gedefinieerd worden, ongeacht welk type panel de beoordeling uitvoert. Zo moet er rekening gehouden worden met de demografische eigenschappen van het panel zoals de leeftijd, de genderverdeling en het aantal deelnemers. Daarnaast is ook de gezondheidstoestand van de deelnemers van belang. Visuele beperkingen, allergieën of het dragen van een vals gebit zijn niet gewenst voor een goede evaluatie. Tot slot moet de deelnemer ook een goed concentratievermogen bezitten (Djekic et al., 2021).

De ruimte waarin een evaluatie plaatsvindt, moet ook aan enkele eisen voldoen. Zo moet er een aangename temperatuur en vochtigheid heersen en moeten de muren neutraal van kleur zijn. Gedetailleerdere vereisten en richtlijnen voor een goede panelbeoordeling worden door verschillende bronnen beschreven (ASTM International, 1997; Watts et al., 1989). Naast panels kunnen sensorische eigenschappen ook instrumenteel bepaald worden (Barrett et al., 2010).

### 2.4.2.1 Textuur

Een kropsla van goede kwaliteit moet knapperig en niet verwelkt zijn (Barrett et al., 2010). Voor de textuurbeoordeling van sla wordt daarom voornamelijk gekeken naar de knapperigheid (Gude et al., 2021). Knapperigheid kan gedefinieerd worden als 'de intensiteit van het hoorbare geluid bij de eerste bijt met de kiezen' (Gude et al., 2021) en kan naast consumenten- of panelbeoordeling ook instrumenteel bepaald worden (Barrett et al., 2010).

Lei & Engeseth (2021) onderzocht het verschil in textuur tussen sla geteeld in volle grond en sla geteeld in een hydroponisch systeem. De textuur werd hiervoor op instrumentele wijze bepaald. In het onderzoek werd vastgesteld dat de benodigde kracht, om de buitenste bladeren en de middennerf van de buitenste en middelste bladeren te breken, groter was voor sla uit een hydroponisch systeem. Wetende dat een grotere kracht overeenkomt met een fermere textuur, is hydroponisch geteelde sla dus knapperiger dan sla uit volle grond (Lei & Engeseth, 2021).

### 2.4.2.2 Smaak

Smaak kan onderverdeeld worden in vijf basissmaken, namelijk zout, zoet, bitter, zuur en umami (Barrett et al., 2010). In sla zijn zoet en bitter de belangrijkste basissmaken. Zij worden respectievelijk door T1R- en T2R-receptoren op de smaakpapillen van de tong waargenomen. De smaakperceptie is echter afhankelijk van gender en leeftijd. Vrouwen zouden namelijk een beter smaakvermogen bezitten dan mannen. Ook zouden jonge mensen (vooral kinderen) gevoeliger zijn voor bitterheid dan ouderen (Chadwick et al., 2016).

Belangrijke componenten in sla, verantwoordelijk voor de bittere smaak, zijn sesquiterpeenlactonen (SL). Door hun bittere aspect verminderen ze de smakelijkheid en schrikken ze de consument af. Zoetheid daarentegen trekt de consument aan, in het bijzonder consumenten die weinig sla consumeren. De zoete smaak van sla is voornamelijk aan glucose te wijten. Fructose is echter zoeter dan glucose, maar glucose is abundanter. De uiteindelijk waargenomen smaak is een resultaat van de vermenging van de basissmaken. Zo is er ook interactie tussen zoet- en bitterheid, namelijk bitterheid wordt tegengewerkt door zoetheid (Chadwick et al., 2016).

Aangezien consumenten zoete producten verkiezen, kan het zoeter maken van sla mogelijks de consumptie ervan laten toenemen (Chadwick et al., 2016). Zhang et al. (2019) onderzocht het effect van extra belichting op de smaak in de slateelt onder glas. Het resultaat was een zoetere sla met een betere nasmaak indien deze geen extra belichting kreeg. Deze werden dus meer gewaardeerd door de consument.

#### 2.4.2.3 Geur

De geur van sla wordt bepaald door vrijgestelde vluchtige componenten. Sla bevat niet-volatiele precursoren van vluchtige componenten, die bij minimale bewerking (zoals versnijding) kunnen vrijkomen onder volatiele vorm. Daarnaast kunnen volatiele stoffen gevormd worden in bepaalde stress-geïnduceerde metabolische processen. Verpakte sla kan bovendien bij zuurstofgebrek overgaan op een anaeroob metabolisme waarbij ethanol en aceetaldehyde worden vrijgesteld (zie [Respiratie en transpiratie](#)). Tot slot, kunnen vluchtige componenten ook vrijgesteld worden door micro-organismen op de sla (Lonchamp et al., 2009).

Lonchamp et al. (2009) detecteerde maar liefst 53 volatiele componenten in verpakte kropsla. Of deze componenten effectief worden waargenomen, is afhankelijk van hun olfactorische grenswaarde (geurdrempel) (Smyth et al., 1998). Smyth et al. (1998) onderzocht de vluchtige componenten geproduceerd door versneden ijsbergsla in een verpakking met gemodificeerde atmosfeer. Bij een bewaringstemperatuur van 5°C, 10°C en 20°C vonden zij dat ethanol en aceetaldehyde boven de olfactorische grens gelegen waren. Bij 10°C werd ook dimethylsulfide gedetecteerd. Deze vluchtige stof veroorzaakt een geur van bederf en is dus ongewenst (Lonchamp et al., 2009; Smyth et al., 1998). Vermoedelijk wordt deze component gevormd door micro-organismen die bij 10°C groeien (Smyth et al., 1998).

Vluchtige stoffen kunnen indicatoren zijn voor de kwaliteit van sla. Zo stelde Lonchamp et al. (2009) dat de versheid van sla kan nagegaan worden op basis van het gehalte aan dimethylethylfenol en esters van pentanoïnezuur. Daarnaast zouden cis-3-dodecene en  $\beta$ -elemene indicatoren zijn voor kwaliteitsverlies (Lonchamp et al., 2009).

#### 2.4.2.4 Visueel aspect

##### Kleur

De kleur van sla is een belangrijk aspect bij de kwaliteitsbeoordeling (Martínez-Ispizua et al., 2022). Consumenten gaan namelijk vaak op kleur af om de versheid en kwaliteit van een product in te schatten. Voor sla geldt dat bruine vlekjes, vergeling en verwelking niet door de consument worden geapprecieerd (Barrett et al., 2010). Hoe bruinkleuring ontstaat, wordt later besproken in [Enzymatische bruinverkleuring](#).

De pigmenten aanwezig in de plant zijn verantwoordelijk voor de kleur. In sla is chlorofyl verantwoordelijk voor de groene kleur. De rode kleur is daarentegen afkomstig van anthocyanen (Barrett et al., 2010; Zhang et al., 2019), betalaïnes en gedeeltelijk carotenoïden (Barrett et al., 2010). Deze laatste kunnen ook voor een gele of oranje kleur zorgen. Ook flavonoïden vertonen een gele kleur (Barrett et al., 2010). De bladkleur kan beïnvloed worden door belichting zoals eerder aangehaald in [Licht](#).

Naast panelbeoordeling, kan de kleur ook instrumenteel bepaald worden. Zo wordt vaak gebruik gemaakt van een colorimeter (Barrett et al., 2010; Zhang et al., 2019). Hierbij worden 3 waarden gemeten. Allereerst de  $a^*$  waarde die de verhouding groen op rood weergeeft, de  $b^*$  waarde die de blauw op geel verhouding uitdrukt en tot slot de  $L^*$  waarde die de helderheid weergeeft (Zhang et al., 2019).

## Rand

Rand is een fenomeen waarbij de bladranden van voornamelijk jonge bladeren necrotisch kleuren. Op die manier lijkt het alsof de bladranden verbrand zijn, vandaar de benaming *tipburn* in het Engels. Vooral kropvormende bladgroenten, zoals kolen en botersta, zijn hiervoor gevoelig. Het voorkomen van rand doet de productkwaliteit dalen. Voor telers kan dit grote economische verliezen met zich meebrengen. Zo zou tot 50% van de oogst verloren kunnen gaan door rand (Ertle, 2023; Olle & Bender, 2009; Saure, 1998).

Rand in jonge bladeren wordt vaak gelinkt aan een calciumdeficiëntie (Ertle, 2023; Olle & Bender, 2009; Saure, 1998). Calcium is een zo goed als immobiel macronutriënt dat in de plant getransporteerd wordt via de transpiratiestroom (Olle & Bender, 2009). Dit mineraal is essentieel voor de structuur van de celwand, speelt een rol in de intercellulaire signalisatie en is van belang voor membraanfuncties en ladingsbalansen in de vacuole (Ertle, 2023).

Bij grote groeisnelheid wordt in het binnenste van de krop een microklimaat gevormd met een hoge RV (Saure, 1998). Deze hoge RV maakt het moeilijk voor de jongste bladeren om voldoende te transpireren waardoor er niet voldoende calcium tot bij de cellen geraakt (Olle & Bender, 2009). Dit leidt tot het verzwakken van celwanden en lekken van melksap uit melksapvaten, met necrotische verkleuring van omringende cellen als gevolg (Ertle, 2023).

Verschillende factoren kunnen het voorkomen van rand beïnvloeden waaronder licht (Olle & Bender, 2009). Zo kan rand vermeden worden door planten niet bloot te stellen aan een te hoge lichtintensiteit of aan een te lange fotoperiode. Daarnaast kan ook een verroodfilter rand voorkomen. Verrood licht zorgt namelijk voor stengelverlenging (en dus snelle groei), terwijl rood licht de opname van calcium bevordert. Een andere belangrijke factor is temperatuur. Een hoge temperatuur zorgt namelijk voor een meer uitgesproken voorkomen van rand (Olle & Bender, 2009).

## 2.5 Houdbaarheid

De houdbaarheid van *Lactuca sativa* L. is een belangrijk gegeven. Telers kunnen namelijk tot wel 40% van hun totale opbrengst verliezen door naooogstdegradatie. Deze degradatie is te wijten aan de verder durende respiratie, transpiratie en enzymatische processen na de oogst (Lareo et al., 2009). Daarnaast zijn *Lactuca sativa* L. en andere bladgroenten ook sterk onderhevig aan bederf omdat ze vaak blootgesteld worden aan mechanische schade tijdens bewaring en transport (Min et al., 2021). In dit deel wordt verder ingegaan op enkele oorzaken van bederf en mogelijkheden om de houdbaarheid te verlengen.

### 2.5.1 Bederf

#### 2.5.1.1 Respiratie en transpiratie

Er is geweten dat producten na de oogst metabolisch actief blijven en senescentie ondergaan. Een indicator voor deze metabolische activiteit is de respiratie (Martínez-Ispizua et al., 2022). De respiratie is een proces waarbij energierijke eindproducten uit de fotosynthese, zoals sucrose en zetmeel, worden omgezet naar  $\text{CO}_2$  en energie (onder de vorm van ATP). Daarnaast wordt er tijdens de respiratie ook zuurstof geconsumeerd (Yu et al., 2023) en worden groeiprecursoren

en metabolieten voor de aanpassing aan stressvolle omstandigheden gevormd. De metabolische processen hierbij betrokken, zijn de glycolyse, de citroenzuurcyclus, oxidatieve fosforylatie en de mitochondriale elektronentransportketen (O'Leary & Plaxton, 2016).

Wanneer er niet voldoende zuurstof ter beschikking is, gaan planten over op hun anaeroob metabolisme. Hierbij wordt slechts 2-3 ATP gevormd, wat inefficiënt is vergeleken met de aerobe respiratie, waarbij 36-38 ATP wordt gevormd (Zahra et al., 2021). Het anaeroob metabolisme produceert bovendien, zoals eerder vermeld, ongewenste producten zoals acetaldehyde, ethanol en lactaat (Beaudry, 2000).

Zowel respiratie als transpiratie zorgen voor vochtverlies (dehydratatie), met gewichtsverlies als gevolg. Vochtverlies leidt ook tot afname in celurgiditeit en celwanddegradatie, met ongunstige veranderingen in kleur en textuur tot gevolg, die de consument terughoudend maken. Een goed behoud van vocht in sla tijdens de bewaring heeft dus een economisch belang (Agüero et al., 2008).

#### **2.5.1.2 Enzymatische bruinverkleuring**

Één van de belangrijkste oorzaken van kwaliteitsverlies is enzymatische bruinverkleuring tijdens de bewaring (Chiesa et al., 2004). Deze bruinverkleuring is te wijten aan de enzymatische afbraak van fenolen door polyfenoloxidase (PPO), een enzym met een lage affiniteit voor zuurstof (Smyth et al., 1998). In deze oxidatiereactie worden fenolen omgezet in quinonen, die vervolgens gepolymeriseerd worden. Hoewel de gevormde quinonen gekleurd zijn, is de typische roodbruine kleur, die bij bruinverkleuring voorkomt, te wijten aan gevormde polymeren zoals melanine (Yoruk & Marshall, 2003). De enzymatische werking van PPO zou volgens Yoruk & Marshall (2003) niet enkel leiden tot verkleuring maar ook tot ongewenste veranderingen in smaak, textuur en nutritionele kwaliteit.

#### **2.5.1.3 Microbieel bederf**

Naast planteigen processen zoals transpiratie, respiratie en enzymatische processen, kunnen ook micro-organismen zorgen voor bederf van sla. Roberts et al. (2020) stelt dat het onmogelijk is om alle vormen van microbiële besmetting in CEA te vermijden. Een onderzoek van Mohammad et al. (2022) toonde zelfs aan dat er geen statistisch significant verschil is in slabesmetting met enkele humane pathogenen tussen conventionele, organische en hydroponische teeltsystemen. Contaminatie in CEA kan optreden via werknemers, via zaad of via slecht onderhouden installaties (Roberts et al., 2020). De ventilatie in CEA is een belangrijke oorzaak van ziekteverspreiding, maar is noodzakelijk om de overvloedige vochtigheid afkomstig van transpiratie en evaporatie af te voeren. Een te hoge luchtvochtigheid kan namelijk de groei van bepaalde pathogenen stimuleren. Bovendien kan er door een slechte afstemming van temperatuur en vochtigheid condensatie optreden op de teeltstructuren. Waterdruppels kunnen dan vallen op gewassen en de verspreiding van ziektes bevorderen (Roberts et al., 2020).

Belangrijke schadeverwekkers in sla zijn *Erwinia carotovora*, *Bremia lactucae*, *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum* en *Sclerotinia minor*. Allen leiden ze tot grote economische verliezen (Tournas, 2005). Daarnaast zijn er enkele humane pathogenen die op sla kunnen voorkomen zoals *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Shigella*, *Pseudomonas* en *Enterobacter* (Magnuson et al., 1990; Mohammad et al., 2022). Ook gisten zoals *Candida* en schimmels zoals *Aspergillus*, *Penicillium* en *Cladosporium* kunnen op sla terug gevonden worden. Deze zijn echter minder frequent (Magnuson et al., 1990).

In het onderzoek van Lareo et al. (2009) waren  $5,8 \cdot 10^7$  bacteriële *colony forming units* (cfu's) per gram aanwezig op ongewassen sla. Aan de hand van een chloorinebehandeling was het mogelijk dit aantal tot  $8 \cdot 10^5$  te beperken. Het aantal

schimmels en gisten bedroeg  $6,6 \cdot 10^4$  cfu's per gram en kon tot  $6 \cdot 10^2$  gereduceerd worden door een chlorinebehandeling. Lareo et al. (2009) stelt dat de houdbaarheid ten einde loopt indien er voor mesofiele bacteriën een waarde van  $10^8$  cfu's per gram wordt behaald en voor gisten en schimmels  $10^5$  cfu's per gram.

## 2.5.2 Verbeteren van de houdbaarheid

### 2.5.2.1 Invloed van temperatuur en relatieve vochtigheid

Om een langere houdbaarheid te bekomen, moet het respiratieproces vertraagd worden. Dit is mogelijk door de temperatuur en relatieve vochtigheid te controleren.

Het verlagen van de temperatuur doet in de eerste plaats biochemische reacties vertragen (Lareo et al., 2009). Een optimale temperatuur voor de bewaring zou tussen de  $0^\circ\text{C}$  en  $2^\circ\text{C}$  gelegen zijn (Agüero et al., 2008; Gross et al., 2016; Manolopoulou et al., 2010). Daarnaast zorgt een lage temperatuur ook voor het behoud van kleur en een vertraagde groei van micro-organismen (Lareo et al., 2009; Manolopoulou et al., 2010).

De relatieve vochtigheid, op zijn beurt, ligt idealiter tussen 97% en 99% (Agüero et al., 2008). Martínez-Ispizua et al. (2022) beweert dat sla haar kwaliteit vijftien dagen kan behouden bij  $0^\circ\text{C}$  en een RV van 95%. Door sla onder hoge relatieve vochtigheid te bewaren, wordt verlies van turgor, en dus verwelking tegengegaan (Gross et al., 2016). Peng et al. (2020) stellen dat de invloed van de relatieve vochtigheid op de respiratie binnen verpakking met gemodificeerde atmosfeer nog onduidelijk is. Enerzijds zou het kunnen dat de relatieve vochtigheid een directe impact heeft op de respiratie omdat water een reactiecomponent is in de respiratie. Anderzijds is er ook de mogelijkheid dat de transmissiesnelheid van zuurstof doorheen de verpakkingsfilm door de relatieve vochtigheid beïnvloed wordt (Peng et al., 2020).

### 2.5.2.2 Invloed van licht

Naast de controle van temperatuur en relatieve vochtigheid moet ook rekening worden gehouden met licht aangezien deze factor de nutritionele balans van het product beïnvloedt (Martínez-Ispizua et al., 2022).

In het donker ondergaat de plant een proces genaamd *dark induced senescence*, waarbij koolhydraten sneller verbruikt worden. Later in de bewaring worden ook zuurstofradicalen (ROS - *Reactive Oxygen Species*) gevormd die de membraanintegriteit van cellen tenietdoen waardoor de celinhoud lekt (Min et al., 2021).

Volgens Min et al. (2021) kan de houdbaarheid verlengd worden door de planten bloot te stellen aan een hogere lichtintensiteit tijdens de teeltperiode. Een hogere lichtintensiteit leidt namelijk tot een hoger gehalte aan koolhydraten en vitamine C en dus een betere antioxidanten- en energiestatus op het oogsttijdstip. Naast een verbeterde visuele kwaliteit, is de plant ook beter beschermd tegen zuurstofradicalen door het hoger gehalte aan vitamine C. Concreet kan dus gesteld worden dat een hogere nutritionele kwaliteit bij oogst leidt tot een verbeterde houdbaarheid (Min et al., 2021).

Tot slot kan, zoals ook vermeld in [End of Production \(EoP\)- en naoogstlichtbehandelingen](#), licht ingezet worden om ongewenste micro-organismen te bestrijden. Enerzijds kan licht planteigenschappen sturen waardoor de waardplant minder aantrekkelijk wordt voor pathogenen. Anderzijds kan licht inspelen op de groei en ontwikkeling van micro-organismen. Zo zouden nabij-UV en blauw licht de sporulatie van *Botrytis cinerea* verhinderen. Het toedienen van rood licht zou bovendien de waardplantresistentie tegen pathogenen doen toenemen (Meng et al., 2020; Roberts et al., 2020).

### 2.5.2.3 Verpakking onder gemodificeerde atmosfeer (MAP)

Aan de hand van een verpakking met een gemodificeerde atmosfeer (MAP) kunnen respiratie, transpiratie, microbieel bederf en oxidatieve stress gereduceerd worden. Op die manier kan de houdbaarheid verlengd worden (Soltani Firouz et al., 2021). Binnen het verpakken met een gemodificeerde atmosfeer kan nog een onderscheid gemaakt worden tussen actieve en passieve MAP (Ares et al., 2008).

Actieve MAP bestaat erin om een product te verpakken onder een atmosfeer met een welbepaalde gewenste samenstelling (Ares et al., 2008). De samenstelling van het ingebrachte gas wordt gekozen in functie van de respiratie. Het respiratieproces consumeert namelijk zuurstof en produceert CO<sub>2</sub> (Manolopoulou et al., 2010; Martínez et al., 2008; Soltani Firouz et al., 2021). Daarom wordt vaak een gassamenstelling met een laag zuurstofgehalte (0,5-3%) en hoog CO<sub>2</sub>-gehalte (5-10%) gehanteerd (Manolopoulou et al., 2010). Volgens Soltani Firouz et al. (2021) is CO<sub>2</sub> bovendien voordelig voor het behoud van chlorofyl. Martínez et al. (2008) daarentegen stelt dat een CO<sub>2</sub>-gehalte groter dan 2% de vorming van donkere vlekken op botersla in de hand werkt. Hierbij moet vermeld worden dat botersla gevoeliger is voor de vorming van donkere vlekken dan andere cultivars (Martínez et al., 2008).

Indien het product in omgevingslucht verpakt wordt en de atmosfeer zich instelt enkel en alleen door de combinatie van respiratie en filmpermeabiliteit, is er sprake van passieve MAP (Ares et al., 2008). In dat geval moet rekening gehouden worden met de permeabiliteit van de film voor zuurstof, CO<sub>2</sub> en waterdamp (Martínez et al., 2008). Aangezien er een nauwe relatie is tussen de respiratie en de doorlaatbaarheid van de film, wordt over het algemeen gekozen voor een film die toelaat om het zuurstofgehalte laag en het CO<sub>2</sub>-gehalte hoog te houden (Gross et al., 2016).

### 2.5.2.4 Andere factoren

Ook andere factoren spelen een rol in de bewaring van sla zoals de hoeveelheid die verpakt wordt en het al dan niet versnijden van de sla. Dit berust ook hier op het beïnvloeden van de respiratie. Peng et al. (2020) toonde aan dat een kleine hoeveelheid verpakte sla meer bruinverkleuring vertoonde dan een grotere hoeveelheid in hetzelfde verpakkingsvolume. Er wordt aangeraden om het zuurstofgehalte negatief te correleren met de verpakte hoeveelheid om het voorkomen van bruinverkleuring te reduceren (Smyth et al., 1998).

Het versnijden van sla heeft ook een sterke invloed op de houdbaarheid. Peng et al. (2020) vermeldt dat grotere stukken sla minder onderhevig zijn aan bederf dan kleinere en extra verwonde stukken. Door het versnijden van de sla, wordt de sla verwond en is ze dus gevoeliger voor bederf. Een hogere graad van verwonding kan namelijk leiden tot een grotere respiratiesnelheid (Martínez et al., 2008). Bovendien kan water makkelijker uit het beschadigde weefsel treden door transpiratie, met gewichtsverlies tot gevolg (Manolopoulou et al., 2010). Tot slot is ook de versnijdingswijze van belang. Martínez et al. (2008) maakt een onderscheid tussen versnijden met een bot en een scherp mes, maar ook het verkleinen van de bladeren met de hand. Het versnijden van sla met een scherp mes zou beter zijn voor de houdbaarheid in vergelijking met een bot mes. De beste methode is echter het verkleinen met de hand, oftewel het scheuren van de sla. Op die manier worden de slabladeren verkleind volgens hun zwakkere plekken en zou de respiratiesnelheid lager liggen. Veel voorkomende bederfsymptomen bij versneden sla zijn verwelking en roos- en bruinverkleuring (Martínez et al., 2008; Peng et al., 2020).

### 3 MATERIAAL EN METHODEN

#### 3.1 Plantmateriaal en kiemingsperiode

Zaadjes van *Lactuca sativa* L. cv. 'Alyssa' (Rijk Zwaan, Enkhuizen, Nederland) werden gezaaid in Jiffy-7-plugs (Jiffy Products International B.V., Zwijndrecht, Nederland) doordrenkt met voedingsoplossing (Tabel 4). De zaden kiemden in een groeikamer van de Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen (departement Plant en Gewas, onderzoeksgroep Horticulture) onder wit ledlicht (NS12, Valoya, Helsinki, Finland) met een intensiteit van  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  en een samenstelling van 21,3% blauw, 41,5% groen en 37,2% rood licht. Tijdens de kiemingsperiode bedroeg de fotoperiode 16h/8h licht/donker. De gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid (RV) tijdens deze periode zijn voor beide experimenten terug te vinden in Tabel 5 en werden gemeten via DL-USB-173 temperatuur/RV dataloggers (ATAL, Purmerend, Nederland). De plugs werden, indien nodig, met voedingsoplossing besprenkeld om ze vochtig te houden. De zaailingen van de tweede proef werden behandeld op 2 februari 2024 met Signum (6,7% pyraclostrobin en 26,7% boscalid) omwille van schimmelaantasting.

Tabel 4: Samenstelling van de voedingsoplossing.

| Meststof                  | Concentratie (mmol/L) | Micronutriënten  | Concentratie ( $\mu\text{mol/L}$ ) |
|---------------------------|-----------------------|------------------|------------------------------------|
| $\text{NO}_3^-$           | 12,99                 | B                | 15,70                              |
| $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ | 1,34                  | $\text{Cu}^{2+}$ | 0,98                               |
| $\text{SO}_4^{2-}$        | 2,11                  | $\text{Fe}^{3+}$ | 27,20                              |
| $\text{K}^+$              | 6,74                  | $\text{Mn}^{2+}$ | 8,01                               |
| $\text{Ca}^{2+}$          | 4,22                  | Mo               | 0,52                               |
| $\text{Mg}^{2+}$          | 1,69                  | $\text{Zn}^{2+}$ | 3,98                               |

De voedingsoplossing werd gemaakt met 5 L kraantjeswater en 44 L demiwater. De samenstelling ervan wordt weergegeven in Tabel 4. Er werd gestreefd naar een elektrische geleidbaarheid (EC) van 2,0-2,2 dS/m en een pH van 5,5-5,6.

Tabel 5: Gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid  $\pm$  SE tijdens de kiemingsperiode van het eerste en tweede experiment.

|              | Temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Relatieve vochtigheid (%) |
|--------------|------------------------------------|---------------------------|
| Experiment 1 | $18,0 \pm 0,0$                     | $71,9 \pm 0,1$            |
| Experiment 2 | $15,8 \pm 0,0$                     | $70,1 \pm 0,0$            |

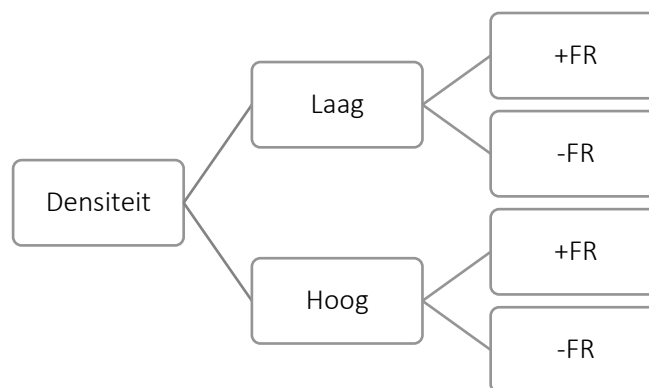
Na drie weken werden de kiemplanten in bakken geplaatst (afmetingen: 400 X 300 X 120 mm) en werd 3L voedingsoplossing toegevoegd (Tabel 4). De oplossing werd 20 minuten per uur belucht en afgeschermd van licht aan de hand van een lichtondoorlatende plasticfolie om algengroei te vermijden. De fotoperiode bedroeg 16h/8h licht/donker. Aangezien de gebruikte cultivar dagneutraal is, gingen de planten niet over naar een generatieve groeifase onder invloed van de lange belichtingstijd van 16 uur.

### 3.2 Experiment 1: Invloed van lichtkwaliteit en plantdichtheid op het voorkomen van rand

In het eerste experiment werd nagegaan of plantdichtheid en het toevoegen van verrood licht aan het spectrum een invloed vertoonden op het voorkomen van rand. Hiervoor werden 12 kiemplanten onder hoge dichtheid (6 per bak, 50 planten/m<sup>2</sup>) en 12 kiemplanten onder lage dichtheid (3 per bak, 25 planten/m<sup>2</sup>) geplaatst op 9 oktober 2023. Planten bij lage dichtheid werden evenwichtig verspreid over de bak. De planten groeiden onder GreenPower LED productiemodules (Philips, Eindhoven, Nederland). Voor elke dichtheid werd de helft van de planten al dan niet blootgesteld aan verrood (FR) licht. De algemene opzet van het eerste experiment is te zien in [Figuur 8](#). De spectrale eigenschappen worden weergegeven in [Tabel 6](#) en werden gemeten met een SS-110 spectroradiometer (Apogee Instruments, Logan, UT, VS). De verroodfractie (FR-fractie) werd berekend volgens (Kusuma & Bugbee, 2021):

$$\text{FR-fractie} = \frac{\text{verrode foton flux}}{\text{rode foton flux} + \text{verrode foton flux}}$$

waarbij het verrode licht reikte van 720 tot 740 nm en het rode licht van 650 tot 670 nm. De verhouding tussen rood licht, gelegen tussen 655 en 665, en het verrood licht, gelegen tussen 725 en 735 nm, wordt weergegeven via de rood/verrood-verhouding (R/FR), volgens Holmes & Smith (1977). PSS staat voor de fytochroom fotostationaire fase en werd bepaald zoals beschreven in Sager et al. (1988). Deze drie parameters (FR-fractie, R/FR-verhouding en PSS) zijn verschillende maten voor de fytochroom effecten.



*Figuur 8: Schematische weergave van de algemene opzet van het eerste experiment, +FR: toevoeging van verrood aan PAR, -FR: geen toevoeging van verrood aan PAR.*

Tabel 6: Spectrale eigenschappen voor de verschillende behandelingen (LD-FR: lage plantdensiteit, zonder verrood; LD+FR: lage plantdensiteit, met verrood; HD-R: hoge plantdensiteit, zonder verrood; HD+FR: hoge plantdensiteit, met verrood), waarbij Blauw, Groen, Rood, PAR, Verrood en ePAR de fotonfluxen  $\pm$  SE van de respectievelijke golflengtes weergeven. R/FR geeft de verhouding tussen rood en verrood licht weer. PSS staat voor de fytochroom fotostationaire fase en FR-fractie geeft de fractie verrood in het lichtspectrum weer.

| Behandeling | Blauw (B)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | Groen (G)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | Rood (R)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | PAR<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | Verrood (FR)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | ePAR<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | R/FR     | PSS   | FR-fractie<br>% |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------|-------|-----------------|
| LD-FR       | 24,1 $\pm$ 0,5                                                       | 0,5 $\pm$ 0,0                                                        | 173,7 $\pm$ 3,6                                                     | 198,3 $\pm$ 4,1                                                | 0,9 $\pm$ 0,1                                                           | 199,2 $\pm$ 4,1                                                 | $\infty$ | 0,883 | 0,0             |
| LD+FR       | 24,4 $\pm$ 0,5                                                       | 1,0 $\pm$ 0,1                                                        | 181,2 $\pm$ 3,4                                                     | 206,6 $\pm$ 3,9                                                | 60,0 $\pm$ 1,2                                                          | 266,6 $\pm$ 5,0                                                 | 4,5      | 0,814 | 20,0            |
| HD-FR       | 23,0 $\pm$ 0,3                                                       | 1,1 $\pm$ 0,0                                                        | 175,9 $\pm$ 2,2                                                     | 200,0 $\pm$ 2,5                                                | 0,5 $\pm$ 0,0                                                           | 200,5 $\pm$ 2,5                                                 | $\infty$ | 0,884 | 0,0             |
| HD+FR       | 23,8 $\pm$ 0,3                                                       | 2,8 $\pm$ 0,2                                                        | 175,6 $\pm$ 2,4                                                     | 202,2 $\pm$ 2,7                                                | 52,8 $\pm$ 0,7                                                          | 255,0 $\pm$ 3,3                                                 | 4,9      | 0,818 | 19,3            |

Één tot twee keer per week werden de EC en de pH in de bakken nagegaan aan de hand van een HI991301 pH/EC/TDS meter (Hanna Instruments, Temse, België). Indien, voor de meerderheid van de bakken, de EC en pH niet binnen de gewenste grenzen vielen ( $EC < 2,0 \text{ dS/m}$  of  $EC > 2,2 \text{ dS/m}$ ,  $pH < 5,5$  of  $pH > 5,6$ ), of er verwacht werd dat deze binnen korte tijd niet meer binnen de grenzen zouden vallen, werd de voedingsoplossing vervangen. Indien enkel de EC te hoog was, werd een 10/90 kraantjeswater/demiwater-oplossing toegevoegd tot een aanvaardbare EC werd bekomen. De zuurstofconcentratie van de voedingsoplossing werd gemonitord met de Phenomenal OX 4100 H zuurstofsensor (VWR, Radnor, PA, VS).

De gemiddelde EC en pH over de hele groeiperiode bedroegen respectievelijk  $2,0 \pm 0,4 \text{ dS/m}$  en  $6,3 \pm 0,5$ . Het zuurstofgehalte in de voedingsoplossing tijdens de groeiperiode was gemiddeld  $7,2 \text{ mg/L}$ . De temperatuur en relatieve vochtigheid werden opgevolgd met DL-USB-173 temperatuur/RV dataloggers (ATAL, Purmerend, Nederland) en de gemiddelden per behandeling zijn terug te vinden in [Tabel 7](#).

*Tabel 7: Gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid  $\pm$  SE voor de verschillende behandelingen (LD-FR: lage plantdensiteit, zonder verrood; LD+FR: lage plantdensiteit, met verrood; HD-FR: hoge plantdensiteit, zonder verrood; HD+FR: hoge plantdensiteit, met verrood).*

| Behandeling | Temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Relatieve vochtigheid (%) |
|-------------|------------------------------------|---------------------------|
| LD-FR       | $17,9 \pm 0,0$                     | $80,1 \pm 0,1$            |
| LD+FR       | $18,9 \pm 0,0$                     | $75,5 \pm 0,2$            |
| HD-FR       | $18,1 \pm 0,0$                     | $77,2 \pm 0,1$            |
| HD+FR       | $18,5 \pm 0,0$                     | $77,0 \pm 0,1$            |

De planten werden geoogst op 7 en 8 november 2023 (30 en 31 dagen na planten (DAT – *Days After Transplanting*). Een deel van de planten werd gebruikt voor de bepaling van de bladoppervlakte, het beoordelen van rand, de bepaling van het vers- en drooggewicht en nitraten. Een ander deel werd ingevroren aan  $-80^{\circ}\text{C}$ , vermalen met vijzel en stamper en goed gehomogeniseerd voor verdere analyses. Om de stalen tijdens het vermalen koel te houden, werd vloeibare stikstof gebruikt.

### 3.2.1 Bladoppervlakte en beoordeling van rand

De bladeren van elke krop (afzonderlijk) werden één voor één van de stengel gehaald en op een lichtgevende plaat (RS Components Ltd., Corby, Verenigd Koninkrijk) gefotografeerd aan de hand van een Canon 2000D digitale camera (Canon, Tokyo, Japan). De kleinste blaadjes ( $< \pm 1 \text{ cm}$ ) werden niet gefotografeerd en bleven op de stengel. Aan de hand van ImageJ 1.53 software (National Institutes of Health, VS) werd de bladoppervlakte bepaald. Daarnaast werd het aantal bladeren met rand geteld en werd een score op een schaal van 0 tot 3 (0 = intact, 1 = gematigd, 2 = ernstig, 3 = extreem) gegeven om de ernst van de rand per blad in kaart te brengen (Kader et al., 1973). Hieruit kon een randindex (RI) afgeleid worden aan de hand van onderstaande formule, geïnspireerd op de ziekte index uit plantenpathologie (Curvers et al., 2010):

$$RI = \frac{0 \times a + 1 \times b + 2 \times c + 3 \times d}{(a + b + c + d) \times 3} * 100$$

waarbij a, b, c en d het aantal bladeren weergeven waarvan de ernst van rand respectievelijk 0, 1, 2 en 3 bedroeg. [Figuur 9](#) geeft weer hoe de randscores werden toegekend.

| 0<br>Intact                                                                       | 1<br>Gemiddeld                                                                    | 2<br>Ernstig                                                                      | 3<br>Extreem                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |

*Figuur 9: Visuele representatie van de randcores.*

### 3.2.2 Vers- en drooggewicht

Voor de bepaling van het vers- en drooggewicht, werden eerst grote en kleine aluminiumbakjes afgewogen. Vervolgens, na de beoordeling, werden de bladeren in een grote aluminiumbak geplaatst en gewogen. De stengel, die overbleef na verwijdering van de bladeren, werd gewogen in een klein aluminiumbakje. Beiden (bladeren en stengel in hun aluminiumbak) werden in de droogoven geplaatst aan 70°C, gedurende drie dagen. Na drie dagen werden ze opnieuw gewogen.

### 3.2.3 Pigmenten

De bepaling van pigmenten werd gebaseerd op het werk van Arnon (1949), Lichtenthaler (1987) en Wellburn (1994). Voor de extractie van pigmenten werd ca. 90 mg van de bevroren, vermalen stalen afgewogen. Aan elk afgewogen staal werd 1,5 mL van een 80% aceton oplossing toegevoegd. Na vortexen werden de stalen afgeschermd met aluminiumfolie en bewaard aan -20°C gedurende 24 uur.

Vervolgens werden de stalen gecentrifugeerd aan 4000 rpm gedurende 10 minuten. Hierna werd van elk staal drie keer 200 µL geanalyseerd via een spectrofotometer (Infinite 200, Tecan Group Ltd., Männedorf, Zwitserland), samen met drie keer 200 µL van de blanco controle (80% aceton). De absorptie werd bepaald aan de hand van drie golflengtes: 470 nm, 647 nm en 663 nm. Vervolgens werd een correctie voor de padlengte (0,6 cm) uitgevoerd aan de hand van de Lambert-Beer wet. De gehalten aan chlorofyl A, chlorofyl B en carotenoïden in het staal werden tot slot berekend via onderstaande formules.

$$\text{Chlorofyl A } \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) = 12,25 \times \text{Absorbantie}_{663} - 2,79 \times \text{Absorbantie}_{646}$$

$$\text{Chlorofyl B } \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) = 21,5 \times \text{Absorbantie}_{646} - 5,1 \times \text{Absorbantie}_{663}$$

$$\text{Carotenoïden } \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) = \frac{(1000 \times A_{470} - 1,82 \times \text{Chlorofyl A} - 85,02 \times \text{Chlorofyl B})}{198}$$

Tot slot werden de concentraties van pigmenten in het staal omgerekend naar de concentratie in de bladeren in mg/g versgewicht.

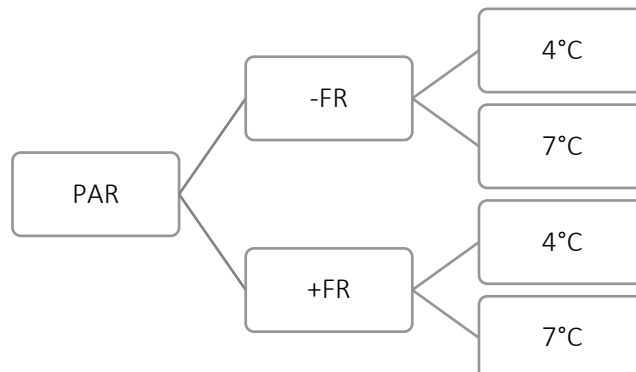
### 3.2.4 Nitraten

Het nitraatgehalte van de sla werd bepaald volgens het werk van Cataldo et al. (1975). Er werd ca. 100 mg van de gedroogde, vermalen stalen afgewogen. Hieraan werd 10 mL milliQ water toegevoegd. Na vortexen werden de stalen in een warmwaterbad geplaatst aan 45°C gedurende één uur. Vervolgens werden de stalen gefilterd waarna het filtraat vier keer werd verdund met milliQ water. Daarnaast werd ook een verdunningsreeks gemaakt om later een standaardcurve op te stellen. Hiervoor werd een stockoplossing gemaakt van 1000 mg nitraat-N/L aan de hand van  $\text{NaNO}_3$ .

Vervolgens werd 8  $\mu\text{L}$  van een 5% (gewicht/volume) oplossing van salicylzuur in geconcentreerd zwavelzuur toegevoegd aan de verdunde extracten en aan de verdunningsreeks. Na 20 minuten werd ook 190  $\mu\text{L}$  van een 16% (gewicht/volume) oplossing van NaOH in geconcentreerd zwavelzuur toegevoegd. Vijf minuten later werden de stalen en de verdunningsreeks geanalyseerd met een spectrofotometer (Infinite 200, Tecan Group Ltd., Männedorf, Zwitserland) bij een golflengte van 410 nm. De hoeveelheid nitraten werd omgerekend tot mg/g versgewicht.

### 3.3 Experiment 2: Invloed van lichtkwaliteit en bewaartemperatuur op de kwaliteit en houdbaarheid van versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer (MAP)

Met het tweede experiment werd getracht de invloed van lichtkwaliteit en bewaartemperatuur op de kwaliteit en houdbaarheid van versneden, verpakte (MAP) sla te achterhalen. Hiervoor werden de kiemplanten op 15 februari 2024 verdeeld over de bakken (6 per bak, 50 planten/ $\text{m}^2$ ) onder de GreenPower LED productiemodules (Philips, Eindhoven, Nederland). De helft van de planten kreeg een toevoeging van verrood licht aan het spectrum, de andere helft niet. In [Figuur 10](#) wordt de algemene opstelling van het tweede experiment weergegeven. [Tabel 8](#) geeft de spectrale samenstelling en lichtintensiteiten weer. De FR-fractie, PSS en R/FR-verhouding werden berekend zoals beschreven in [3.2](#).



*Figuur 10: Schematische weergave van de algemene opzet van het tweede experiment, +FR: toevoeging van verrood aan PAR, -FR: geen toevoeging van verrood aan PAR, 4°C en 7°C geven de naaogstbewaar temperatuur weer.*

*Tabel 8: Spectrale eigenschappen voor de verschillende behandelingen (-FR4: geen verrood, bewaring bij 4°C; -FR7: geen verrood, bewaring bij 7°C; +FR4: verrood, bewaring bij 4°C; +FR7: verrood, bewaring bij 7°C), waarbij Blauw, Groen, Rood, PAR, Verrood en ePAR de fotonfluxen  $\pm$  SE van de respectievelijke golflengtes weergeven. R/FR geeft de verhouding tussen rood en verrood licht weer. PSS staat voor de fytochroom fotostationaire fase en FR-fractie geeft de fractie verrood in het lichtspectrum weer.*

| Behandeling | Blauw (B)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | Groen (G)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | Rood (R)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | PAR<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | Verrood (FR)<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | ePAR<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | R/FR     | PSS   | FR-fractie<br>% |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------|-------|-----------------|
| -FR4        | 22,6 $\pm$ 0,4                                                       | 0,2 $\pm$ 0,0                                                        | 167,7 $\pm$ 2,9                                                     | 190,5 $\pm$ 3,3                                                | 0,3 $\pm$ 3,4                                                           | 190,8 $\pm$ 5,1                                                 | $\infty$ | 0,883 | 0,0             |
| -FR7        | 21,6 $\pm$ 0,2                                                       | 0,8 $\pm$ 0,0                                                        | 169,7 $\pm$ 1,3                                                     | 192,1 $\pm$ 1,5                                                | 0,2 $\pm$ 0,0                                                           | 192,3 $\pm$ 1,5                                                 | $\infty$ | 0,885 | 0,0             |
| +FR4        | 25,0 $\pm$ 0,5                                                       | 0,6 $\pm$ 0,0                                                        | 185,5 $\pm$ 3,2                                                     | 211,4 $\pm$ 3,7                                                | 57,3 $\pm$ 1,0                                                          | 262,5 $\pm$ 4,6                                                 | 4,8      | 0,818 | 18,7            |
| +FR7        | 22,1 $\pm$ 0,2                                                       | 1,4 $\pm$ 0,1                                                        | 168,4 $\pm$ 1,6                                                     | 192,2 $\pm$ 1,9                                                | 51,5 $\pm$ 0,5                                                          | 238,8 $\pm$ 2,3                                                 | 4,9      | 0,817 | 19,3            |

De EC, pH en zuurstofconcentratie werden opgevolgd zoals in het eerste experiment. De gemiddelde EC en pH over de hele groeiperiode bedroegen respectievelijk  $2,0 \pm 0,2$  dS/m en  $6,25 \pm 0,5$ . Gedurende de groeiperiode bedroeg het gemiddelde zuurstofgehalte van de voedingsoplossing 6,7 mg/L. De temperatuur en relatieve vochtigheid werden opgevolgd met DL-USB-173 temperatuur/RV dataloggers (ATAL, Purmerend, Nederland) en de gemiddelden per behandeling zijn terug te vinden in [Tabel 9](#).

*Tabel 9: Gemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid  $\pm$  SE voor de verschillende lichtbehandelingen (-FR: geen verrood, +FR: verrood).*

| Behandeling | Temperatuur (°C) | Relatieve vochtigheid (%) |
|-------------|------------------|---------------------------|
| -FR         | $19,5 \pm 0,0$   | $76,1 \pm 0,2$            |
| +FR         | $19,3 \pm 0,0$   | $76,0 \pm 0,2$            |

Op 7 maart 2024 (22 DAT) werden de slaplanten geoogst, versneden en verpakt in een TOP 40PA folie (Amcor, Zürich, Zwitserland) onder gemodificeerde atmosfeer ( $\pm 3\%$  O<sub>2</sub>,  $\pm 97\%$  N<sub>2</sub>, 450 mbar) met behulp van een Multivac C300 vacuümverpakkingstoestel (Multivac, Mechelen, België) verbonden met een Witt MG18-3MSO gasmenger (Gasetechnik, Duitsland). Om de grootte van de verpakkingzakjes te bepalen, moest de respiratiesnelheid van de sla achterhaald worden via respiratiemetingen. Hiervoor werd ca. 50 g sla afgewogen in respiratieflessen ([Figuur 11](#)) die vervolgens gevuld werden met een gasmengsel van 10% zuurstof en 90% stikstofgas (650 mbar) met behulp van een Multivac C300 vacuümverpakkingstoestel (Multivac, Mechelen, België) verbonden met een Witt MG18-3MSO gasmenger (Gasetechnik, Duitsland), en bewaard bij 4°C of 7°C. Zuurstof- en CO<sub>2</sub>-metingen werden om de 12-24h uitgevoerd met behulp van de Dansensor CheckPoint O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> (Dansensor/Ametek Mocon, VS) en Dansensor CheckMate 3 (Dansensor/Ametek Mocon, VS). Aan de hand van de bekomen gegevens kon de richtingscoëfficiënt van de raaklijn bij 3% zuurstof bepaald worden en daaruit de respiratiesnelheid.



*Figuur 11: Respiratiefles met versneden sla. Bovenaan in de rode dop bevindt zich het septum waarlangs de gasconcentraties werden gemeten.*

De verpakking werd gemaakt uit TOP 40PA folie (Amcor, Zürich, Zwitserland) met een permeabiliteit voor O<sub>2</sub> van  $423 \text{ ml} \cdot 24\text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ . De oppervlakte van de zakjes werd berekend aan de hand van de volgende formule (Jacxsens et al., 1999):

$$A = \frac{RO_2 \times W}{OTR \times (O_{2\text{out}} - O_{2\text{in}})}$$

met

$A$  ( $m^2$ ): oppervlakte van de zak

$RO_2$  ( $ml\ O_2 \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ ): respiratiesnelheid bij  $7^\circ C$  en een zuurstofpercentage van 3%

$W$  (kg) = gewicht van verpakte sla

$OTR$  ( $ml \cdot 24h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot atm^{-1}$ ): transmissiesnelheid van zuurstof doorheen de verpakking

$O_{2\_out}$  (%):  $O_2$  concentratie van de buitenomgeving

$O_{2\_in}$  (%):  $O_2$  concentratie in de verpakking.

Wetende dat de breedte van de folie 47 cm is, werd de tweede zijde berekend. Dit resulteerde in zakjes van 47 x 21,5 cm.

Na verpakken werd de sla bewaard in koelkamers bij  $4^\circ C$  of  $7^\circ C$ , in het donker. Op verschillende momenten na oogsten (DAH – *Days After Harvest*) werden verpakkingen geopend om de evolutie van componenten en organoleptische kwaliteit doorheen de tijd te evalueren. Alvorens de zakjes te openen, werden de zuurstof- en  $CO_2$ -concentratie in de verpakking gemeten met de Dansensor CheckMate 3 (Dansensor/Ametek Mocon, VS). Zo konden eventuele grote afwijkingen in gasconcentraties opgemerkt worden, die later in acht moeten worden genomen bij het beoordelen van de kwaliteitsparameters. Na de organoleptische beoordeling werden stalen uit de zakjes genomen, die bewaard werden bij  $-80^\circ C$  en later vermalen met vloeibare stikstof, zoals beschreven in Experiment 1: Invloed van lichtkwaliteit en plantdichtheid op het voorkomen van rand voor verdere analyses.

Ook na de oogst werd de respiratiesnelheid van de sla opgevolgd, ditmaal zowel bij  $4^\circ C$  als  $7^\circ C$ . Hiervoor werden de zuurstof- en  $CO_2$ -concentratie gemeten in drie respiratieflessen per behandeling (-FR4, -FR7, +FR4 en +FR7) tot en met 5 DAH met de Dansensor CheckMate 3 (Dansensor/Ametek Mocon, VS).

### 3.3.1 Vers- en drooggewicht

Vers- en drooggewicht werden bepaald, zoals eerder beschreven in 3.2.2, op het oogsttijdstip.

### 3.3.2 Suikers

De suikerextractie werd uitgevoerd op het oogsttijdstip, 1 DAH, 3 DAH, 5 DAH, 7 DAH, 9 DAH en 11 DAH en was gebaseerd op het werk van Christiaens et al. (2015) en Mannheim (1980). Van de vermalen, bevroren stalen werd ca. 250 mg afgewogen. Aan elk afgewogen staal werd 6 mL van een 80% EtOH oplossing toegevoegd. Na vortexen werden de reactietubes in een warmwaterbad aan  $45^\circ C$  geplaatst. Drie uur later werden ze uit het warmwaterbad gehaald. Na het nogmaals vortexen, werden de stalen gecentrifugeerd aan 5000 rpm gedurende 5 minuten. Vervolgens werd zoveel mogelijk supernatans overgebracht in reactietubes, die ca. 200 mg PVPP (polyvinylpyrrolidon) bevatten. De stalen werden, na vortexen, opnieuw gecentrifugeerd aan 5000 rpm voor 5 minuten. Vervolgens werd de ethanol verdampt en werden de stalen opnieuw opgelost in koude 90% acetonitril. De stalen werden daarna gecentrifugeerd aan 11.000 rpm gedurende 5 minuten. Het supernatans werd gefilterd doorheen een Chromafil filter met een poriëngrootte van  $0,20\ \mu m$  (Roth GmbH, Karlsruhe, Duitsland). Het filtraat werd tot slot in een vial overgebracht voor analyse, uitgevoerd via een Acquity H-Class UPLC-systeem (Waters) gekoppeld aan een Acquity verdampende lichtverstrooiingsdetector (ELSD - *Evaporative Light Scattering Detector*, Waters) in combinatie met een Acquity UPLC BEH amide kolom ( $130\ \text{\AA}$ ,  $1,7\ \mu m$ ,  $2,1\ mm \times 100\ mm$ ; Waters). De kolomtemperatuur bedroeg  $55^\circ C$  en het injectievolume  $10\ \mu L$ . De stalen werden geanalyseerd aan een snelheid van  $0,5\ mL/min$  gedurende 8 minuten per staal.

Voor de analyse via UPLC werd een binair gradiëntelutiesysteem toegepast. Gedurende de eerste drie minuten nam de concentratie van eluent A (1% triethylamine in milliQ water) toe van 10% tot 25% en dit werd voor 30 seconden zo behouden. Vervolgens daalde de concentratie van eluent A terug tot 10% in 1 minuut en bleef deze concentratie gedurende

3,5 minuten aangehouden. Het tweede eluent, eluent B, bestond uit 100% acetonitril. Het totale suikergehalte werd berekend als de som van glucose, fructose en sucrose. Indien het sucrosegehalte onder de kwantificatielimiet (0,01 g/L) lag, werd het suikergehalte berekend als de som van glucose en fructose.

### 3.3.3 Pigmenten

De bepaling van pigmenten werd uitgevoerd zoals beschreven in [3.2.3](#) op het oogsttijdstip, en op 1 DAH, 3 DAH, 5 DAH, 7 DAH, 9 DAH en 11 DAH.

### 3.3.4 Vitamine C

De vitamine C-extractie vond plaats op het oogsttijdstip en op 7 DAH en is gebaseerd op het werk van Dodson et al. (1992) en Zapata & Dufour (1992). Er werd ca. 30 g plantmateriaal afgewogen en gemixt met 50 mL extractiebuffer (0,1 M citroenzuur + 0,05 EDTA in 5% MeOH) en vier druppels Antifoam C Emulsion (Sigma Life Science). Dit mengsel werd vervolgens overgebracht naar een maatkolf en aangelengd tot 100 mL met extractiebuffer. Vervolgens werd het extract gefilterd over een ploofilter. Van het filtraat werd 10 mL overgebracht in een falcon tube met 200 mg zuurgewassen actieve kool. Na 30 seconden schudden werd de falcon tube gecentrifugeerd aan 9204 rpm gedurende 11 minuten aan 15°C. Na centrifugatie werd het supernatans gefilterd over een ploofilter en werd 5 mL filtraat overgebracht naar een maatkolf en aangelengd tot 25 mL met 5% methanol, gevolgd door een filtratie over een Whatman 40 filter. Aan 5 mL van dit filtraat werd 1 mL OPD (orthofenyleendiamine dihydrochloride; 2,5 mg/mL) toegevoegd, waarna werd aangelengd tot 10 mL met 5% MeOH (pH = 2,3). Tot slot werd 1 mL van deze oplossing overgebracht in een vial verpakt in aluminiumfolie. Na 60 minuten werden de stalen geanalyseerd via een HPLC 1100 Series (Agilent, Waldbronn, Duitsland) met een fluorescentiedetector (excitatiegolflengte van 350 nm en een emissiegolflengte van 430 nm). Er werd een omgekeerde fase C18 kolom (Pursuit XRs 3 C18, 150 x 4,6 mm) gebruikt met een kolomtemperatuur van 35°C. De mobiele fase bestond uit 5% MeOH, 5 mM cetrimide en 50 mM  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  en had een pH van 4,6. Tijdens de extractieprocedure werden recipiënten afgeschermd van licht aan de hand van aluminiumfolie om oxidatie te vermijden.

Voor het maken van de standaardcurve werd 10 mL van een 0,1 mg/mL oplossing van ascorbinezuur in extractiebuffer aangemaakt. Deze oplossing werd overgebracht in een falcon tube met 200 mg zuurgewassen actieve kool en onderging verder dezelfde stappen als hierboven beschreven. Na filteren over een Whatman 40 filter werd 0; 0,5; 1; 1,5; 2 en 2,5 mL van het filtraat overgebracht in een maatkolf, waaraan simultaan 1 mL OPD werd toegevoegd. Vervolgens werd aangelengd tot 10 mL met 5% MeOH (pH = 2,3). Tot slot werd 1 mL van elke verdunning overgebracht in een vial, afgeschermd van het licht gedurende 60 minuten en via een HPLC 1100 Series (Agilent, Waldbronn, Duitsland) geanalyseerd zoals beschreven in de vorige paragraaf.

### 3.3.5 Microbiële contaminatie: bepaling van het totaal aeroob, psychrotroof kiemgetal

De bepaling van de microbiële contaminatie vond plaats op het oogsttijdstip, op 7 DAH en 13 DAH. Hiervoor werd 10 g verse, versneden sla afgewogen in een steriele stomacherzak. Hieraan werd 90 mL verdunningsoplossing (peptone salt solution, PSS), bestaande uit 1 g bacteriologisch geneutraliseerd pepton en 8,5 g NaCl in 1 L demiwater, toegevoegd. De inhoud van de zak werd goed gemengd in de Stomacher Lab-Blender 400 (Led Techno, België) gedurende één minuut. Vervolgens werden van de zakinhoud verdunningen gemaakt aan de hand van PSS. Op het oogsttijdstip en op 7 DAH werden vier verdunningen gemaakt en op 13 DAH zes verdunningen. Van elke verdunning werd 1 mL in een 90 mm petrischaal overgebracht waar ongeveer 15 mL groeimedium (17,5 g aardappeldextrose agar/L demiwater) werd aan toegevoegd. Het medium en de verdunning werden goed gemengd en na afkoelen geïncubeerd aan 22°C. Na vijf dagen werd het aantal kolonievormende eenheden geteld en omgerekend per gram versgewicht.

Om contaminatie te vermijden, werden zowel de verdunningsoplossing, het groeimedium en pipettipjes geautoclaveerd bij 68,9 kPa en 115°C gedurende 20 minuten. Tijdens het overbrengen van de verdunningen in de petrischalen werd in een steriele omgeving gewerkt.

### 3.3.6 Lekkage van elektrolyten

De bepaling van de elektrolytenlekage is gebaseerd op het werk van Faisal & Anis (2009). Per staal werden zes bladschijfjes met een diameter van 5 mm uitgesneden met een kurkboor. Deze werden in glazen buisjes geplaatst met 20 mL milliQ water. Na 24h afgeschermd van het licht werd de EC gemeten in de buisjes, waarna ze geautoclaveerd werden aan 115°C en 68,9 kPa gedurende 20 minuten. Wanneer de buisjes afgekoeld waren, werd de EC opnieuw gemeten. De verhouding tussen beide EC-metingen is een maat voor de weefselbeschadiging. De lekkage van elektrolyten werd dus berekend als:

$$\text{Lekkage van elektrolyten (\%)} = \frac{EC_{\text{voor autoclaveren}}}{EC_{\text{na autoclaveren}}} \times 100\%$$

De lekkage van elektrolyten werd bepaald op het oogsttijdstip, 1 DAH, 3 DAH, 5 DAH, 7 DAH, 9 DAH, 11 DAH en 13 DAH.

### 3.3.7 Sensorische beoordeling

De sensorische beoordeling van de versneden en verpakte (MAP) sla werd uitgevoerd door 2 personen op 1 DAH, 3 DAH, 5 DAH, 7 DAH, 9 DAH, 11 DAH en 13 DAH. Zowel kleur, textuur en geur werden gescoord op een hedonistische schaal met 9 punten ([Tabel 10](#)) gebaseerd op het onderzoek van Min et al. (2021). Daarnaast werd ook het voorkomen van rand beoordeeld op een hedonistische schaal waarbij 1 = veel voorkomen van rand en 9 = helemaal geen rand. De beoordeling werd uitgevoerd op een goed met daglicht verlichte plaats. Voor verdere interpretatie werd gewerkt met het gemiddelde van beide beoordelaars. De algemene score (OVQ-score – *Overall Visual Qualityscore*) werd berekend als een gemiddelde van de scores voor geur, kleur, textuur en rand.

*Tabel 10: Beschrijving van de hedonistische schaal voor de sensorische beoordeling van versneden sla. Vertaling uit Min et al. (2021).*

|   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 | Excellent        | Heldere en typische natuurlijke kleur van het blad en de bladsteel; geen verbruining zichtbaar; bladeren zijn stevig, knapperig en ruiken naar vers gras. Alle monsters krijgen een score = 9 voor uiterlijk, textuur en geur.                                                 |
| 8 | Zeer goed        | Een lichte verkleuring, verbruining of vergeling is zichtbaar op de snijvlakken van de bladeren. Bladeren zijn nog steeds stevig en knapperig en ruiken naar vers gras. Alle monsters krijgen een score $\geq 8$ voor uiterlijk, textuur en geur.                              |
| 7 | Goed             | Enkele licht verkleurde bladeren en bruine randen zijn toegestaan. Bladeren zijn nog steeds knapperig, gereduceerde verse geur. Alle monsters krijgen een score $\geq 7$ voor uiterlijk, textuur en geur.                                                                      |
| 6 | <u>Voldoende</u> | De gedefinieerde consumentenacceptatiedrempel. Licht verkleurde bladeren en matig bruine randen zijn toegestaan. Geen onaangename geur of textuurbederf. Alle monsters krijgen een score $\geq 6$ en geen enkel monster heeft een score $< 6$ voor uiterlijk, textuur en geur. |
| 5 | Middelmatig      | Enige vergeling en bruinkleuring van het blad; licht bruine bladsteel; donkerbruine snijvlakken; textuurbederf maar nog steeds aanvaardbaar; ontstaan van lichtonaangename geur. Één of meerdere monsters krijgen een score 5 voor uiterlijk, textuur en geur.                 |
| 4 | Limiet           | Duidelijke verkleuring op het blad; bruinkleuring van blad en steel; duidelijk mildzacht van textuur; onaangename geur. Één of meerdere monsters krijgen een score 4 voor uiterlijk, textuur en geur.                                                                          |
| 3 | Pover            | Sterke verkleuring, bruinkleuring van de bladeren; verwelkte textuur; duidelijk onaangename geur. Één of meerdere monsters krijgen een score 3 voor uiterlijk, textuur en geur.                                                                                                |
| 2 | Slecht           | Volledig geel of bruin blad; textuurbederf met vochtlekage; sterke onaangename geur. Één of meerdere monsters krijgen een score 2 voor uiterlijk, textuur en geur.                                                                                                             |
| 1 | Zeer slecht      | Volledig verkleurd blad; vocht lekt uit het bladmateriaal; gefermenteerde geur. Één of meerdere monsters krijgen een score 1 voor uiterlijk, textuur en geur.                                                                                                                  |

### 3.4 Statistische data-analyse

De statistische data-analyse werd uitgevoerd in RStudio (R version 4.2.2, R Core Team, 2022). De pakketten *ggplot2* (Whickham, 2016), *ggpubr* (Kassambara, 2023), *rcompanion* (Mangiafico & Savatore, 2024), *car* (Fox & Weisberg, 2019), *dyplr* (Wickham et al., 2023) en *tidyr* (Wickham & Vaughan, 2024) werden gebruikt voor datavisualisatie en statistische analyse. Twee voorwaarden, normaliteit en homoskedasticiteit, werden nagegaan met respectievelijk de Shapiro-Wilk test en de Levene test. Als aan beide voorwaarden, normaliteit en homoskedasticiteit, werd voldaan, werd Two-Way ANOVA gebruikt voor de bepaling van significante verschillen. De Scheirer-Ray-Hare test werd toegepast indien de data niet voldeed aan minstens één van de twee voorwaarden. Two-Way ANOVA type III werd gebruikt voor de bepaling van significante verschillen wanneer data voldeden aan de normaliteits- en homoskedasticiteitsvoorwaarden, maar groepen met verschillende grootte werden vergeleken. Voor de bepaling van significante effecten werd eerst het model met interactie getest. Indien de interactie niet significant bleek, werd de significantie van de hoofdeffecten bepaald met het model zonder interactie (achterwaartse eliminatie regressie). Voor de analyse van de sensorische beoordeling (experiment 2) werden lineaire regressies opgesteld met behulp van `geom_smooth(method = 'lm')`. De bepaling van statistische verschillen in vitamine C-gehalte werd tot slot met een Two-Sample T-test gedaan voor beide meettijdstippen.

### 3.5 Gebruik van ChatGPT

Tijdens het schrijven van deze masterproef werd ChatGPT (versie 3.5, OpenAI) gebruikt voor het verfijnen van het woordgebruik en van de formuleringen. Nooit werd volledige tekst overgenomen. Daarnaast werd ChatGPT (versie 3.5, OpenAI) geraadpleegd ter ondersteuning van de statistische analyse en het genereren van visualisaties. Interpretaties van gegevens werd nooit door ChatGPT (versie 3.5, OpenAI) gedaan. Deze artificiële-intelligentietool werd met een kritische blik toegepast en de wetenschappelijke integriteit werd ten allen tijde gehandhaafd.

## 4 RESULTATEN

### 4.1 Experiment 1: Invloed van lichtkwaliteit en plantdichtheid op het voorkomen van rand

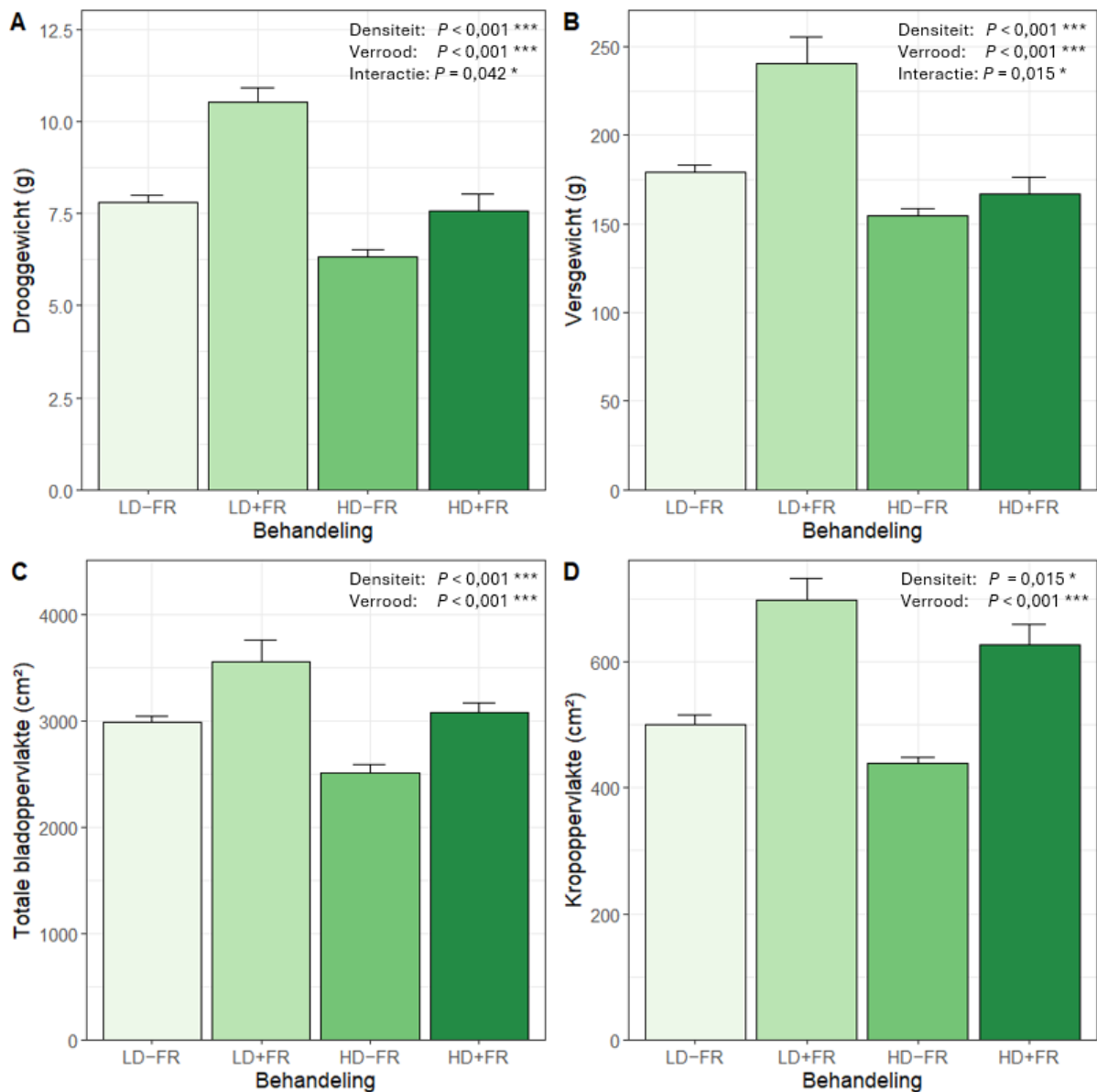
#### 4.1.1 Planteigenschappen en rand

Zowel de plantdensiteit als de aanwezigheid van verrood licht vertoonden een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) op het drooggewicht (*Figuur 12A*), waarbij een hogere plantdensiteit en de afwezigheid van verrood leidden tot een lager drooggewicht. Bovendien had de interactie tussen plantdensiteit en verrood licht een significant effect ( $P = 0,042$ ) op het drooggewicht, maar in mindere mate dan de twee parameters afzonderlijk. Het grootste, gemiddelde drooggewicht werd teruggevonden bij een lage plantdensiteit in combinatie met verrood licht en bedroeg 10,52 g. Het kleinste, gemiddelde drooggewicht (6,32 g) resulteerde uit de behandeling bij hoge plantdichtheid zonder verrood licht.

In *Figuur 12B* wordt de invloed van plantdensiteit en verrood licht op het versgewicht weergegeven. Voor zowel densiteit als verrood werd een zeer significant ( $P < 0,001$ ) effect geobserveerd op het versgewicht. Ook de interactie tussen beide parameters toonde een significant effect ( $P = 0,015$ ) op het versgewicht. Een lage plantdensiteit leidde tot een hoger versgewicht, evenals het toevoegen van verrood licht aan het lichtspectrum.

Daarnaast werd ook de totale bladoppervlakte zeer significant ( $P < 0,001$ ) beïnvloed door de plantdensiteit en door verrood licht (*Figuur 12C*). Het toevoegen van verrood licht zorgde voor het significant toenemen van de totale bladoppervlakte, evenals een lage plantdensiteit. Bij lage plantdensiteit en toevoegen van verrood licht werd een gemiddelde, maximale bladoppervlakte bekomen van 3555,27 cm<sup>2</sup>. De kleinste, gemiddelde bladoppervlakte bedroeg 2505,37 cm<sup>2</sup> en werd terug gevonden bij planten aan hoge plantdensiteit zonder verrood licht.

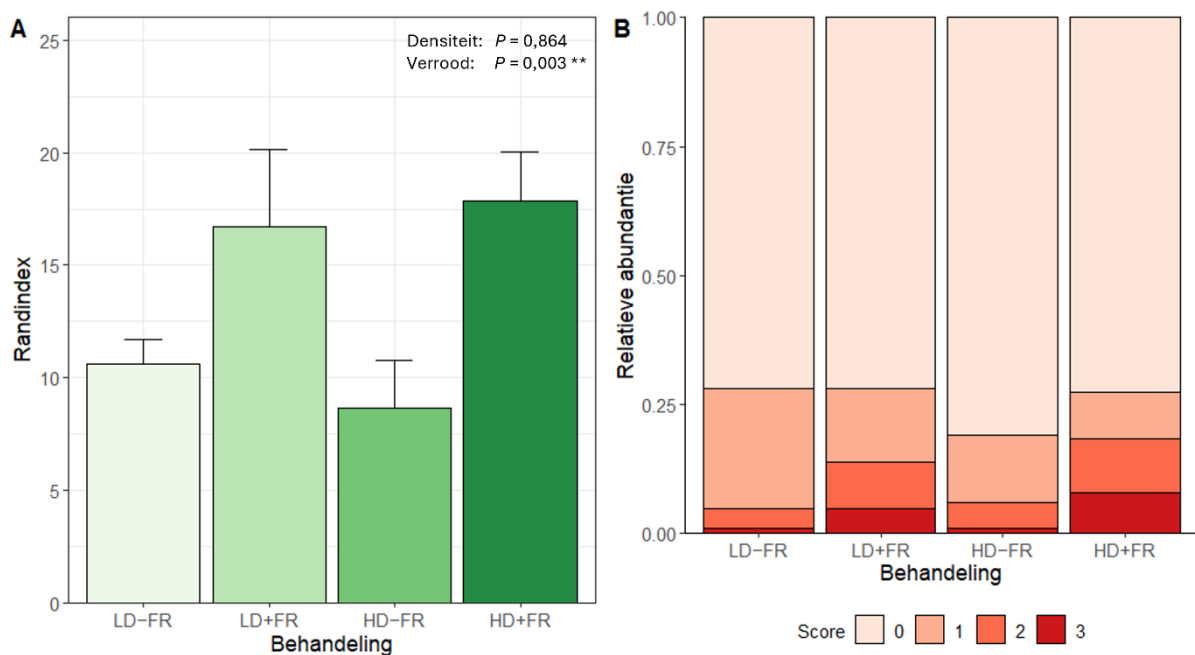
*Figuur 12D* geeft de invloed van plantdensiteit en verrood licht op de kropoppervlakte weer. De densiteit vertoonde een significant effect ( $P = 0,015$ ) en verrood licht een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) op de kropoppervlakte. Een lage plantdensiteit en verrood licht leidden allebei tot een toename van de kropoppervlakte.



Figuur 12: Invloed van plantdensiteit en het toevoegen van verrood licht aan het lightspectrum op (A) het drooggewicht (g), (B) het versgewicht (g), (C) de totale bladoppervlakte (cm<sup>2</sup>) en (D) de kropoppervlakte (cm<sup>2</sup>). De behandelingen worden weergegeven als LD-FR (lage plantdensiteit, zonder verrood licht), LD+FR (lage plantdensiteit, met verrood licht), HD-FR (hoge plantdensiteit, zonder verrood licht) en HD+FR (hoge plantdensiteit, met verrood licht). De grafieken geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error (SE). De P-waarden, bekomen via de Two-Way ANOVA ( $n = 6$ ), worden eveneens per grafiek weergegeven. De P-waarde van de interactie wordt enkel weergegeven indien er interactie was. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als '\*' voor  $P < 0,05$ ; als '\*\*\*' voor  $P < 0,01$  en als '\*\*\*\*' voor  $P < 0,001$ .

De plantdensiteit vertoonde geen significante invloed op de randindex ( $P = 0,864$ ), zoals aangegeven in [Figuur 13A](#). De aanwezigheid van verrood licht deed de randindex echter significant toenemen ( $P < 0,01$ ). De grootste randindex bedroeg 17,87 (hoge plantdensiteit, met verrood) en de kleinste 8,66 (hoge plantdensiteit, zonder verrood).

In [Figuur 13B](#) wordt de relatieve abundantie van de randscores weergegeven, in functie van de plantdensiteit en de aan- of afwezigheid van verrood licht. Bij lage plantdensiteit en afwezigheid van verrood licht werden de bladeren, relatief gezien, het minst geraakt door rand (19%). De overige behandelingen bekwamen onderling zeer gelijkaardige percentages, namelijk 27,33; 27,98% en 27,92% voor hoge densiteit met verrood, lage densiteit zonder verrood en lage densiteit met verrood respectievelijk. De meest ernstige rand (score 3) werd het vaakst teruggevonden bij de behandelingen met verrood licht (7,87% bij hoge densiteit en 4,78% bij lage densiteit), in vergelijking met de behandelingen zonder verrood licht (0,77% bij hoge densiteit en 0,86% bij lage densiteit).



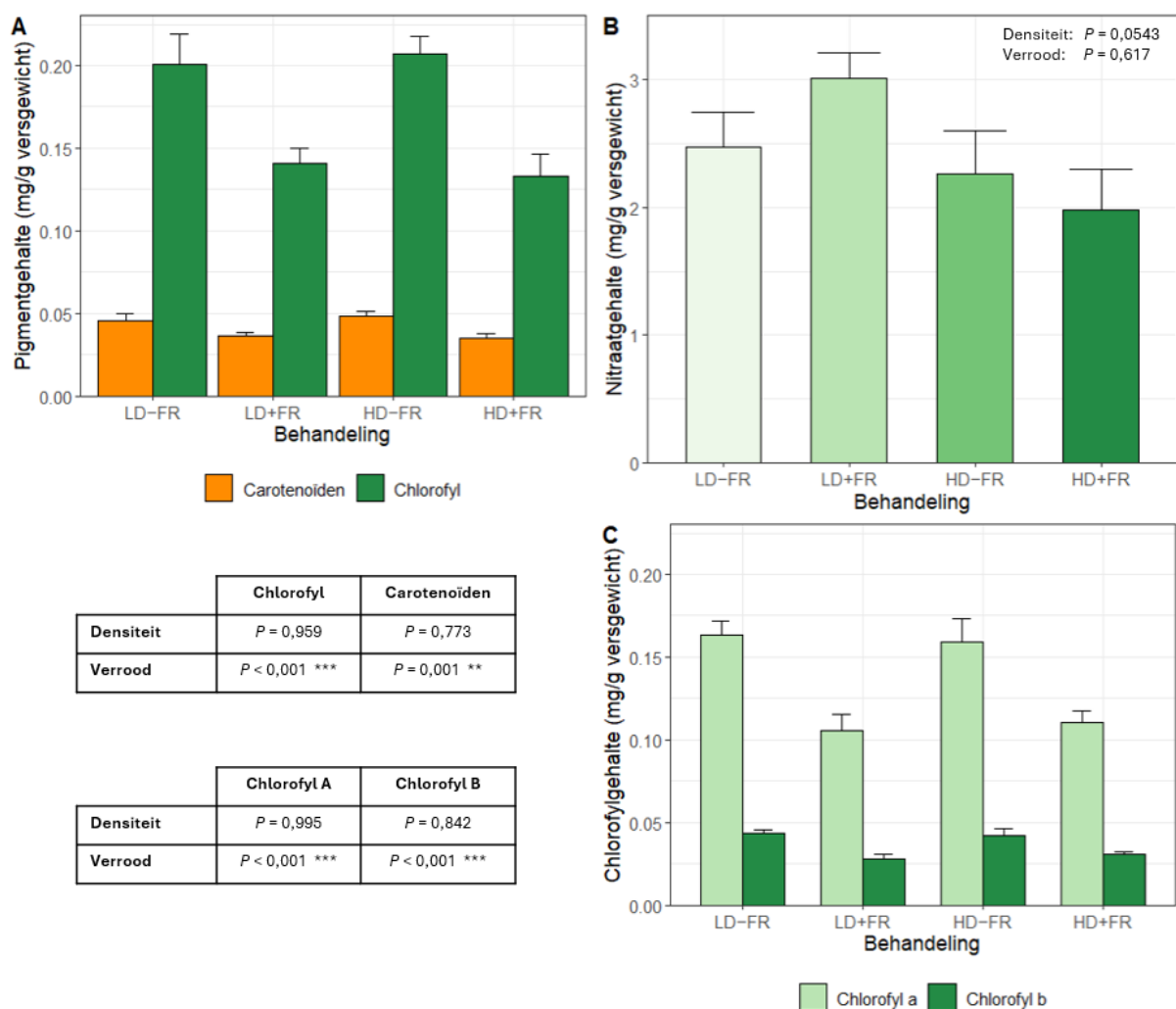
*Figuur 13: Invloed van plantdensiteit en het toevoegen van verrood licht aan het lightspectrum op (A) de randindex en (B) de relatieve abundantie van de randscores (0 = intact, 1 = gematigd, 2 = ernstig, 3 = extreem). De behandelingen worden weergegeven als LD-FR (lage plantdensiteit, zonder verrood licht), LD+FR (lage plantdensiteit, met verrood licht), HD-FR (hoge plantdensiteit, zonder verrood licht) en HD+FR (hoge plantdensiteit, met verrood licht). Grafiek (A) geeft gemiddelde waarden weer met hun standaard error (SE). De P-waarden, bekomen via de Two-Way ANOVA ( $n = 6$ ), worden eveneens in grafiek (A) weergegeven. P-waarde van de interactie wordt enkel weergegeven indien er interactie was. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als  $^{**}$  voor  $P < 0,05$ ; als  $^{***}$  voor  $P < 0,01$  en als  $^{****}$  voor  $P < 0,001$ .*

#### 4.1.2 Pigmenten en nitraten

[Figuur 14A](#) toont het effect van plantdensiteit en verrood licht op het pigmentgehalte. De plantdensiteit vertoonde geen significant effect op het chlorofylgehalte ( $P = 0,959$ ) en het carotenoïdengehalte ( $P = 0,773$ ). De aanwezigheid van verrood deed daarentegen het chlorofyl- en carotenoïdengehalte significant afnemen (respectievelijk  $P < 0,001$  en  $P < 0,01$ ). Het hoogste, gemiddelde pigmentgehalte werd bekomen bij lage plantdensiteit in afwezigheid van verrood licht. Deze behandeling leidde tot 0,207 mg chlorofyl en 0,048 mg carotenoïden per gram versgewicht. De laagste, gemiddelde gehalten bedroegen respectievelijk voor chlorofyl en carotenoïden 0,133 mg en 0,035 mg per gram versgewicht en werden bekomen onder lage plantdensiteit in combinatie met verrood licht.

De plantdensiteit vertoonde geen significant effect ( $P = 0,054$ ) op het nitraatgehalte (Figuur 14B). Het al dan niet toedienen van verrood licht vertoonde eveneens geen significant effect ( $P = 0,617$ ). Het hoogste, gemiddelde nitraatgehalte bedroeg 3,01 mg/g versgewicht (lage plantdensiteit, met verrood) en het laagste, gemiddelde nitraatgehalte was 1,98 mg/g versgewicht (hoge densiteit, met verrood).

In Figuur 14C wordt de hoeveelheid chlorofyl A en chlorofyl B weergegeven in functie van de plantdensiteit en de aan- of afwezigheid van verrood licht. Er werden geen significante verschillen bekomen op basis van de plantdensiteit voor chlorofyl A ( $P = 0,995$ ), noch voor chlorofyl B ( $P = 0,842$ ). Daarentegen worden zeer significante verschillen ( $P < 0,001$ ) waargenomen onder invloed van verrood licht voor beide chlorofylvormen, waarbij de chlorofylvormen afnemen wanneer verrood licht wordt toegediend. De gehalten chlorofyl A en B onder lage plantdensiteit zonder verrood licht bedroegen respectievelijk 0,164 mg en 0,043 mg per gram versgewicht en zijn daarmee het hoogst van alle behandelingen. Planten onder lage densiteit met verrood licht bevatten slechts 0,106 mg chlorofyl A en 0,028 mg chlorofyl B per gram versgewicht en bereikten hiermee de laagste gehalten.



Figuur 14: Invloed van plantdensiteit en het toevoegen van verrood licht aan het lightspectrum op (A) het gehalte aan carotenoiden en chlorofyl, (B) het nitraatgehalte en (C) de chlorofyl A- en chlorofyl B-gehalten. De behandelingen worden weergegeven als LD-FR (lage plantdensiteit, zonder verrood licht), LD+FR (lage plantdensiteit, met verrood licht), HD-FR (hoge plantdensiteit, zonder verrood licht) en HD+FR (hoge plantdensiteit, met verrood licht). De grafieken geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error (SE). De P-waarden van (A) en (C) werden bekomen via de Two-Way ANOVA ( $n = 6$ ), worden in de tabellen weergegeven. Voor (B) werden de P-waarden bekomen via Two-Way ANOVA type III. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als \*\* voor  $P < 0,05$ ; als \*\*\* voor  $P < 0,01$  en als \*\*\*\* voor  $P < 0,001$ .

## 4.2 Experiment 2: Invloed van lichtkwaliteit en bewaartemperatuur op de kwaliteit en houdbaarheid van versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer (MAP)

### 4.2.1 Kwaliteitskenmerken: OVQ-score, cellekkage, microbiële contaminatie en respiratiesnelheid

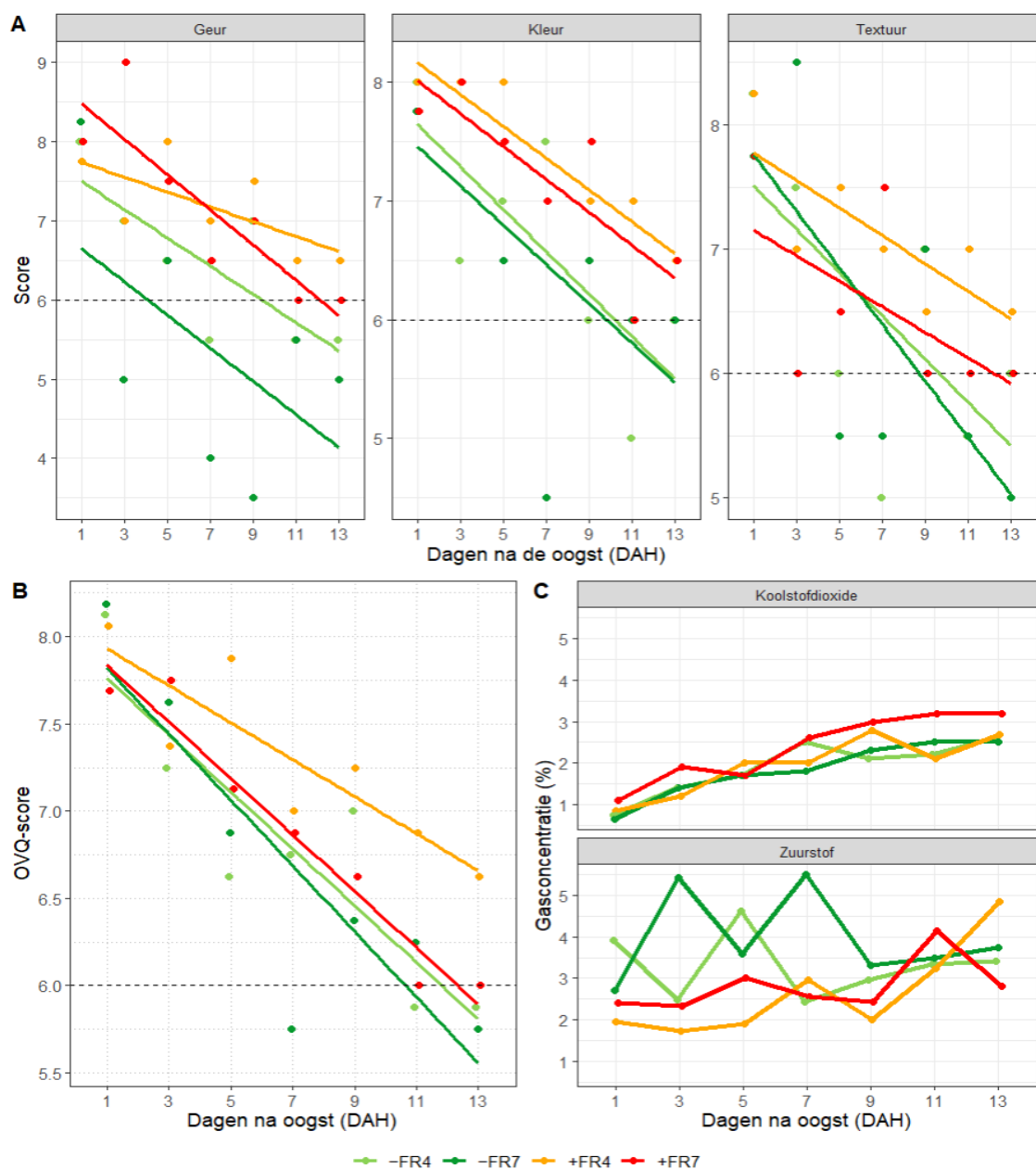
De geur van versneden sla (*Figuur 15A-links*) was over het algemeen beter bij de planten die verrood licht kregen. De sla, die geen verrood kreeg en bewaard werd bij 7°C, had tussen de 3 en 5 dagen na oogsten (DAH) al een geur onder de aanvaardbaarheidsgrens. Planten die zonder verrood groeiden maar bewaard werden bij 4°C, hadden een aanvaardbare geur tot ongeveer 9 DAH. Versneden sla, die onder verrood licht groeide en bewaard werd bij 7°C, behield een aanvaardbare geur tot ongeveer 12 DAH, terwijl de planten, die bij 4°C bewaard werden en die verrood licht kregen, na 13 DAH beter scoorden dan de aanvaardbaarheidsgrens. De traagste achteruitgang in geur werd vastgesteld bij de planten die verrood licht kregen en bewaard werden bij 4°C (richtingscoëfficiënt (RC) = -0,094), terwijl de planten die verrood kregen en bij 7°C bewaard werden, de snelste achteruitgang (RC = -0,223) in geur vertoonden (*Figuur 15D*).

Ook voor kleur scoorden de planten met verrood licht over het algemeen beter (*Figuur 15A-midden*). Zij bleven namelijk tot aan het einde van de onderzoeksperiode (13 DAH) een aanvaardbare kleur behouden. Verpakte sla, die geen verrood licht kreeg, behaalde daarentegen na 13 DAH een score lager dan zes. Een hogere bewaartemperatuur leidde tot een lagere score voor kleur, zowel voor de planten die verrood licht kregen als diegenen die geen verrood licht kregen. De planten die verrood kregen, kenden een tragere kleurdegradatie (RC = -0,134 en RC = -0,138, voor respectievelijk 4°C en 7°C als bewaartemperatuur) dan de planten die geen verrood kregen (RC = -0,179 en RC = -0,165; voor respectievelijk 4°C en 7°C als bewaartemperatuur) (*Figuur 15D*).

De evolutie van de textuur wordt weergegeven in *Figuur 15A-rechts*. Hieruit blijkt dat de verpakte en versneden sla die verrood kreeg steeds een aanvaardbare textuur bleef behouden tot ongeveer 12 DAH. Op 13 DAH behaalden de planten die verrood kregen echter net geen aanvaardbare score voor textuur. De planten die geen verrood kregen, behaalden na ongeveer 9 DAH al geen aanvaardbare textuur meer. De snelste achteruitgang in textuur werd vastgesteld bij de planten die geen verrood kregen (RC = -0,174 en RC = -0,228, voor respectievelijk 4°C en 7°C als bewaartemperatuur) in vergelijking met de planten die wel verrood kregen en voor respectievelijk 4°C en 7°C een RC behaalden van -0,112 en -0,103 (*Figuur 15D*).

In *Figuur 15B* wordt de algemene visuele score (OVQ-score) weergegeven voor de verschillende behandelingen. De score van de sla, die geen verrood licht kreeg, was steeds lager dan diegene van de sla, die wel verrood kreeg. Bovendien had sla zonder verrood licht na ongeveer 11 DAH en 12 DAH (bewaard bij 7°C en 4°C respectievelijk) geen aanvaardbare kwaliteit meer. Sla die verrood kreeg maar bij 7°C werd bewaard, had na ongeveer 12 DAH geen aanvaardbare kwaliteit meer. Op het einde van de meetperiode werd de hoogste score behaald door de sla die verrood licht kreeg en die bewaard werd bij 4°C en de laagste score werd behaald door de planten die geen verrood licht kregen en bewaard werden bij 7°C. De snelste achteruitgang in organoleptische kwaliteit werd geobserveerd bij de sla die geen verrood kreeg en bewaard werd bij 7°C (RC = -0,189) (*Figuur 15D*). De sla die wel verrood licht kreeg en bewaard werd bij 4°C vertoonde de traagste achteruitgang (RC = -0,106). Een gelijkaardige snelheid in achteruitgang werd vastgesteld bij de planten die geen verrood kregen en bewaard werden bij 4°C (RC = -0,163) en de planten die wel verrood licht kregen en bewaard werden bij 7°C (-0,162).

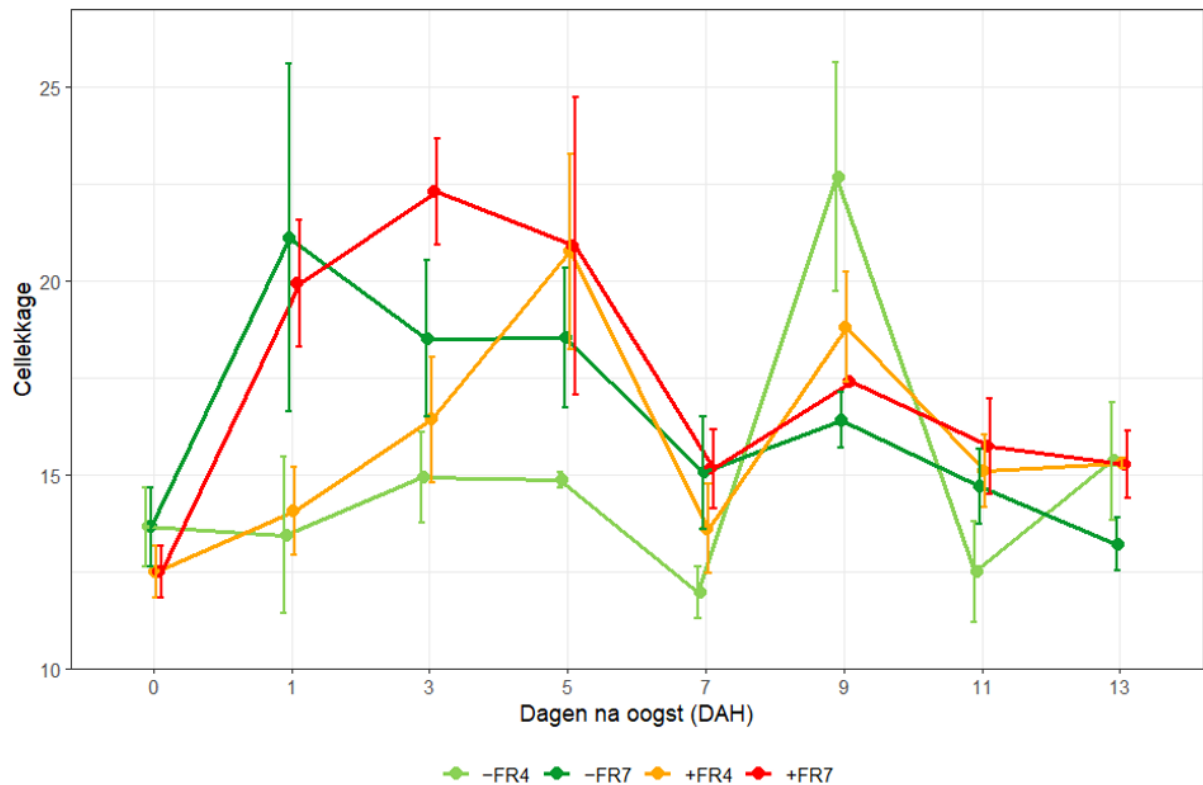
In *Figuur 15C* worden de zuurstof- en koolstofdioxideconcentraties in de verpakkingen, net voor openen, weergegeven. De koolstofdioxideconcentraties lopen voor de verschillende behandelingen over het algemeen gelijk. Met toenemende tijd na oogsten kon een stijging in het koolstofdioxidegehalte opgemerkt worden. Het zuurstofgehalte daarentegen kende meer variatie. Het gemiddelde zuurstofgehalte over alle behandelingen bedroeg 2,75% op 1 DAH en 3,70% op 13 DAH. Voor koolstofdioxide was dit 0,84% op 1 DAH en 2,75% op 13 DAH.



| Behandeling | Geur   |                | Kleur  |                | Textuur |                | OVQ-score |                |
|-------------|--------|----------------|--------|----------------|---------|----------------|-----------|----------------|
|             | RC     | R <sup>2</sup> | RC     | R <sup>2</sup> | RC      | R <sup>2</sup> | RC        | R <sup>2</sup> |
| -FR4        | -0,179 | 0,625          | -0,179 | 0,575          | -0,174  | 0,422          | -0,163    | 0,795          |
| -FR7        | -0,210 | 0,324          | -0,165 | 0,368          | -0,228  | 0,529          | -0,189    | 0,765          |
| +FR4        | -0,094 | 0,471          | -0,134 | 0,852          | -0,112  | 0,625          | -0,106    | 0,765          |
| +FR7        | -0,223 | 0,758          | -0,138 | 0,694          | -0,103  | 0,332          | -0,162    | 0,952          |

Figuur 15: (A) De evolutie van de organoleptische parameters (geur, kleur en textuur) van versneden en verpakte (MAP) sla tot 13 dagen na de oogst (DAH) voor de verschillende behandelingen, (B) de evolutie van de OVQ-score tot 13 DAH voor de verschillende behandelingen, (C) de evolutie van zuurstof- en koolstofdioxideconcentraties (%) in de verpakkingen tot 13 DAH en (D) de richtingscoëfficiënten (RC) en de R<sup>2</sup> waarden voor de lineaire regressielijnen in (A) en (B), bekomen via `geom_smooth(method = 'lm')`. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De horizontale stippenlijn in (A) en (B) stelt de grens van aanvaardbaarheid voor en bevindt zich bij een score van 6 op 9.

In *Figuur 16* wordt de evolutie van de cellekkage weergegeven voor de verschillende behandelingen. Verrood licht vertoonde enkel op 1 DAH ( $P < 0,01$ ) en op 3 DAH ( $P < 0,05$ ) een significant effect op de cellekkage, waarbij het toedienen van verrood licht resulteerde in een verhoogde cellekkage. De bewaartemperatuur vertoonde op geen enkel moment een significante invloed op de cellekkage. Ook interactie tussen verrood licht en bewaartemperatuur was nooit significant.

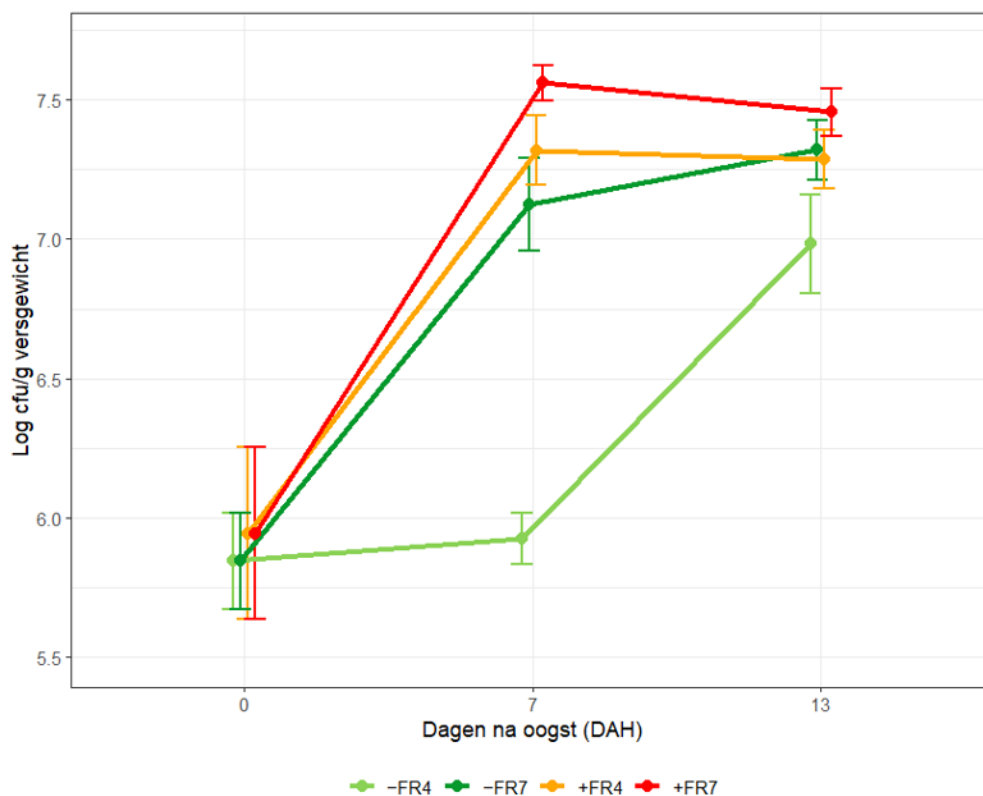


|                          | 0 DAH       | 1 DAH            | 3 DAH           | 5 DAH       | 7 DAH       | 9 DAH       | 11 DAH      | 13 DAH      |
|--------------------------|-------------|------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Verrood</b>           | $P = 0,362$ | $P = 0,005^{**}$ | $P = 0,013^{*}$ | $P = 0,445$ | $P = 0,060$ | $P = 0,059$ | $P = 0,223$ | $P = 0,286$ |
| <b>Bewaartemperatuur</b> | /           | $P = 0,564$      | $P = 0,121$     | $P = 0,119$ | $P = 0,445$ | $P = 0,436$ | $P = 0,127$ | $P = 0,322$ |

*Figuur 16: Invloed van bewaartemperatuur en verrood licht op de cellekkage tot 13 dagen na oogsten (DAH) voor versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De punten op de grafiek geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error ( $\pm SE$ ). De P-waarden worden weergegeven in de tabel onder de figuur en werden bekomen via de Scheirer-Ray-Hare-test voor 1 DAH en 5 DAH en via Two-Way ANOVA voor de overige dagen. Voor 0 DAH en 1 DAH geldt  $n = 6$ , voor de andere dagen geldt  $n = 3$ . Significante waarden worden aangegeven als  $^{*}$  voor  $P < 0,05$ ; als  $^{**}$  voor  $P < 0,01$  en als  $^{***}$  voor  $P < 0,001$ . Op de dag van de oogst (0 DAH) was de P-waarde voor bewaartemperatuur niet relevant. Dit wordt aangegeven met '/*

De microbiële contaminatie van versneden sla wordt weergegeven in [Figuur 17](#) en wordt uitgedrukt in log cfu per gram versgewicht. Op de dag van de oogst werd geen significant effect ( $P = 0,771$ ) opgemerkt van verrood licht op de microbiële contaminatie. Eveneens werd op 13 DAH geen significant effect van verrood vastgesteld, noch van bewaartemperatuur. Op 7 DAH echter hadden zowel verrood licht als bewaartemperatuur een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) op de microbiële contaminatie. Ook de interactie tussen beide parameters vertoonde op dat moment een significant effect ( $P < 0,01$ ).

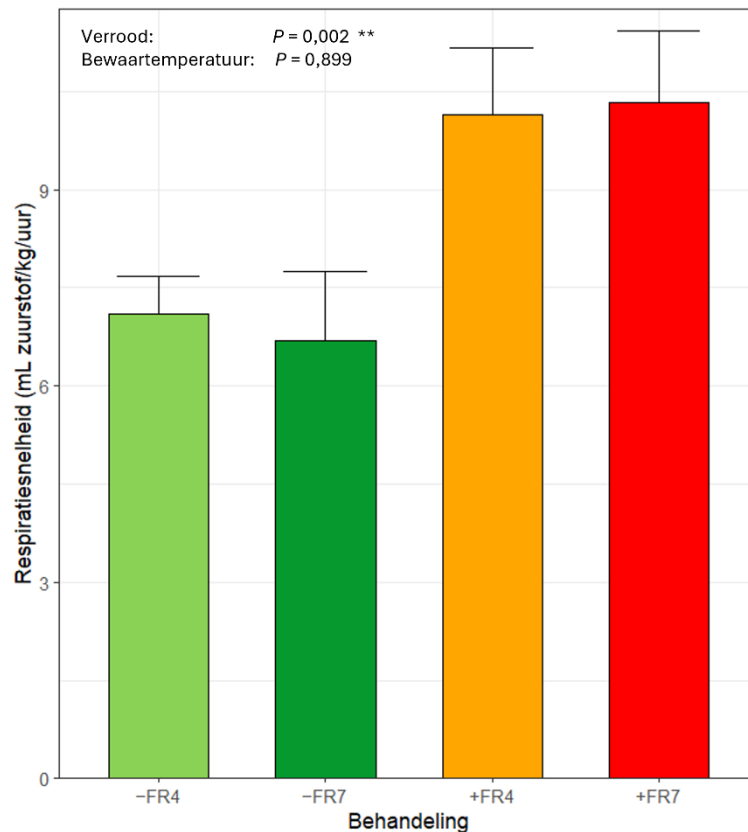
Het toedienen van verrood licht leidde dus tot een verhoogde microbiële contaminatie, net als een verhoogde bewaartemperatuur. Op 7 DAH werd de hoogste microbiële contaminatie bekomen voor de planten die verrood licht kregen en bewaard werden bij 7°C. Zij hadden een microbiële besmetting van 7,56 log cfu-g versgewicht<sup>-1</sup>. De laagste waarde werd na 7 DAH bekomen voor de planten die geen verrood licht kregen en bewaard werden bij 4°C. Zij behaalden een microbiële contaminatie van slechts 5,93 log cfu-g versgewicht<sup>-1</sup>.



|                   | 0 DAH       | 7 DAH           | 13 DAH          |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| Verrood           | $P = 0,771$ | $P < 0,001$ *** | $P = 0,095$     |
| Bewaartemperatuur | /           | $P < 0,001$ *** | $P = 0,097$     |
| Interactie        | /           | $P = 0,002$ **  | Geen interactie |

*Figuur 17: Invloed van bewaartemperatuur en verrood licht op de microbiële contaminatie uitgedrukt als log cfu per gram versgewicht, gemeten op de dag van de oogst en op 7 en 13 dagen na oogsten (DAH) voor versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De punten op de grafiek geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error ( $\pm SE$ ). De P-waarden werden bekomen via Two-Way ANOVA type III voor 0 DAH en 7 DAH en via Two-Way ANOVA ( $n = 6$ ) voor 13 DAH. De P-waarde van de interactie wordt enkel weergegeven indien er interactie was. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als \*\* voor  $P < 0,05$ ; als \*\*\* voor  $P < 0,01$  en als \*\*\*\* voor  $P < 0,001$ . Op de dag van de oogst (0 DAH) was de P-waarde voor bewaartemperatuur, en dus ook de interactie tussen verrood en bewaartemperatuur niet relevant. Dit wordt aangegeven met '/'.*

In *Figuur 18* wordt de invloed van verrood licht en bewaartemperatuur weergegeven op de respiratiesnelheid. Het toedienen van verrood licht vertoonde een significante stijging in respiratiesnelheid ( $P < 0,01$ ). De bewaartemperatuur vertoonde daarentegen geen significante invloed ( $P = 0,899$ ). De hoogste respiratie werd bekomen bij de planten die verrood licht kregen en bewaard werden bij 7°C. Deze planten haalden een gemiddelde respiratiesnelheid van 10,33 mL zuurstof·kg<sup>-1</sup>·uur<sup>-1</sup>. De laagste, gemiddelde respiratiesnelheid bedroeg 6,70 mL zuurstof·kg<sup>-1</sup>·uur<sup>-1</sup> en werd behaald door de planten zonder verrood licht, eveneens bewaard bij 7°C.

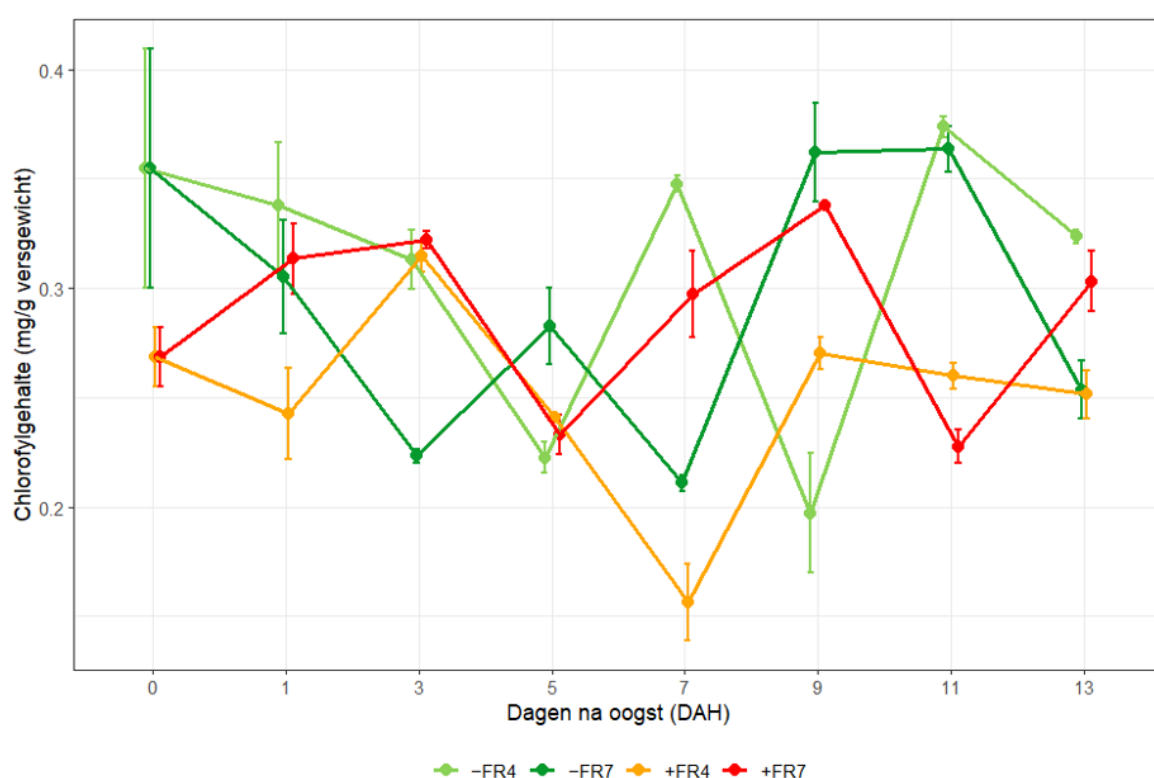


*Figuur 18: Invloed van verrood licht en bewaartemperatuur op de respiratiesnelheid van versneden sla. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De grafieken geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error (SE). De P-waarden, weergegeven in de figuur, werden bekomen via Two-Way ANOVA type III. Significante waarden worden aangegeven als \*\* voor  $P < 0,05$ ; als \*\*\* voor  $P < 0,01$  en als \*\*\*\* voor  $P < 0,001$ .*

## 4.2.2 Fytochemische componenten: pigmenten, vitamine C en suikers

*Figuur 19* geeft de evolutie van chlorofyl weer na oogsten voor de verschillende behandelingen. Voor chlorofyl werd enkel een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) van verrood licht vastgesteld op 3 DAH en 11 DAH. Een kleiner significant effect ( $P < 0,01$ ) van verrood werd vastgesteld op 7 DAH. Op 3 DAH werd ook een zeer significant verschil ( $P < 0,001$ ) opgemerkt op basis van de bewaartemperatuur en eveneens de interactie tussen verrood en bewaartemperatuur was op diezelfde dag zeer significant ( $P < 0,001$ ).

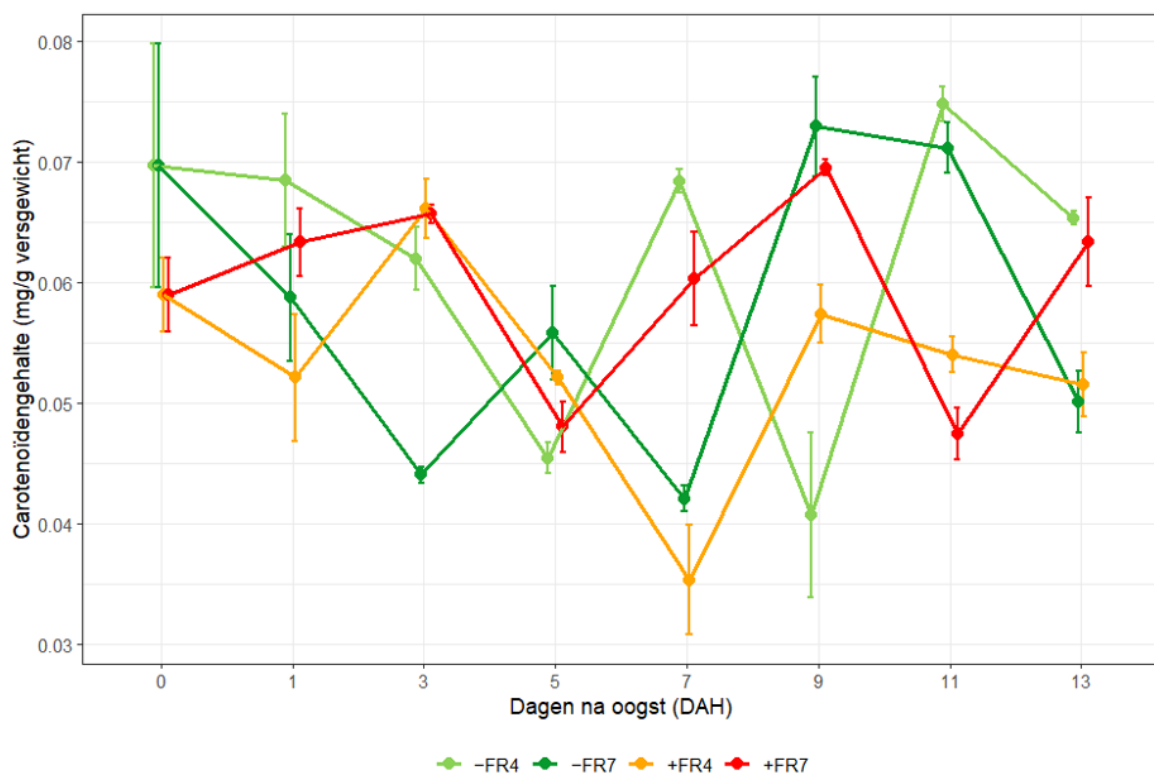
Ook op 7 DAH en 13 DAH had de interactieterm een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) op het chlorofylgehalte. Op 5 DAH en 9 DAH was de interactie tussen beide parameters ook significant ( $P < 0,05$ ), maar op 1 DAH en 11 DAH niet. De bewaartemperatuur had enkel op 3 DAH en 9 DAH een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) en op 5 DAH en 11 DAH een klein significant effect ( $P < 0,05$ ). Op de andere dagen werd geen significant effect van de bewaartemperatuur vastgesteld.



*Figuur 19: Invloed van bewaartemperatuur en verrood licht op het chlorofylgehalte tot 13 dagen na oogsten (DAH) op versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De punten op de grafiek geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error ( $\pm SE$ ). De P-waarden worden onder de grafiek weergegeven in de tabel en werden bekomen via Two-Way ANOVA ( $n = 3$ ). De P-waarde van de interactie wordt enkel weergegeven indien er interactie was. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als '\*' voor  $P < 0,05$ ; als '\*\*' voor  $P < 0,01$  en als '\*\*\*' voor  $P < 0,001$ . Op de dag van de oogst (0 DAH) was de P-waarde voor bewaartemperatuur, en dus ook de interactie tussen verrood en bewaartemperatuur, niet relevant. Dit wordt aangegeven met '/'.*

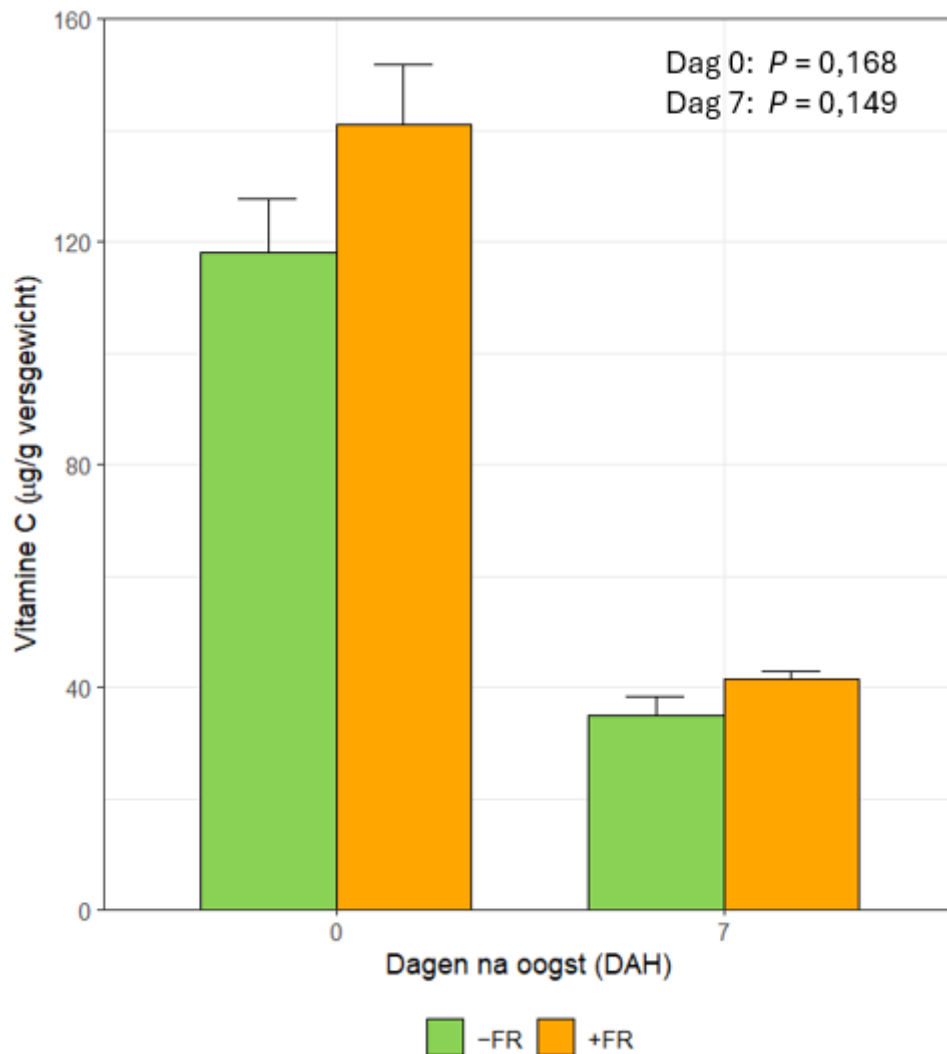
In *Figuur 20* wordt de evolutie van het carotenoidengehalte na oogsten weergegeven. Het gehalte aan carotenoiden werd zeer significant ( $P < 0,001$ ) beïnvloed door verrood licht op 3 DAH en 11 DAH. Ook op 7 DAH oefende verrood licht een significant effect ( $P < 0,05$ ) uit op de hoeveelheid carotenoiden. Op alle andere dagen werd geen significante invloed van verrood licht waargenomen.

De bewaartemperatuur vertoonde enkel een zeer significant effect ( $P < 0,001$ ) op 7 DAH. Kleinere significante verschillen waren op 3 DAH ( $P < 0,01$ ) en 11 DAH ( $P < 0,05$ ) na oogsten op te merken. Op alle andere dagen werd het carotenoidengehalte niet significant beïnvloed door de bewaartemperatuur. Naast bewaartemperatuur en verrood licht, vertoonde ook de interactie tussen beide parameters significante effecten. Zo werden op 3 DAH ( $P < 0,01$ ), 5 DAH ( $P < 0,05$ ) en 9 DAH ( $P < 0,05$ ) na oogsten significante effecten opgemerkt door de interactie en op 7 DAH en 13 DAH zelfs zeer significante verschillen ( $P < 0,001$ ).



*Figuur 20: Invloed van bewaartemperatuur en verrood licht op het carotenoidengehalte tot 13 dagen na oogsten (DAH) op versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De punten op de grafiek geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error ( $\pm SE$ ). De P-waarden worden onder de grafiek weergegeven in de tabel en werden bekomen via Two-Way ANOVA ( $n = 3$ ). De P-waarde van de interactie wordt enkel weergegeven indien er interactie was. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als '\*' voor  $P < 0,05$ ; als '\*\*' voor  $P < 0,01$  en als '\*\*\*' voor  $P < 0,001$ . Op de dag van de oogst (0 DAH) was de P-waarde voor bewaartemperatuur, en dus ook de interactie tussen verrood en bewaartemperatuur, niet relevant. Dit wordt aangegeven met '/'.*

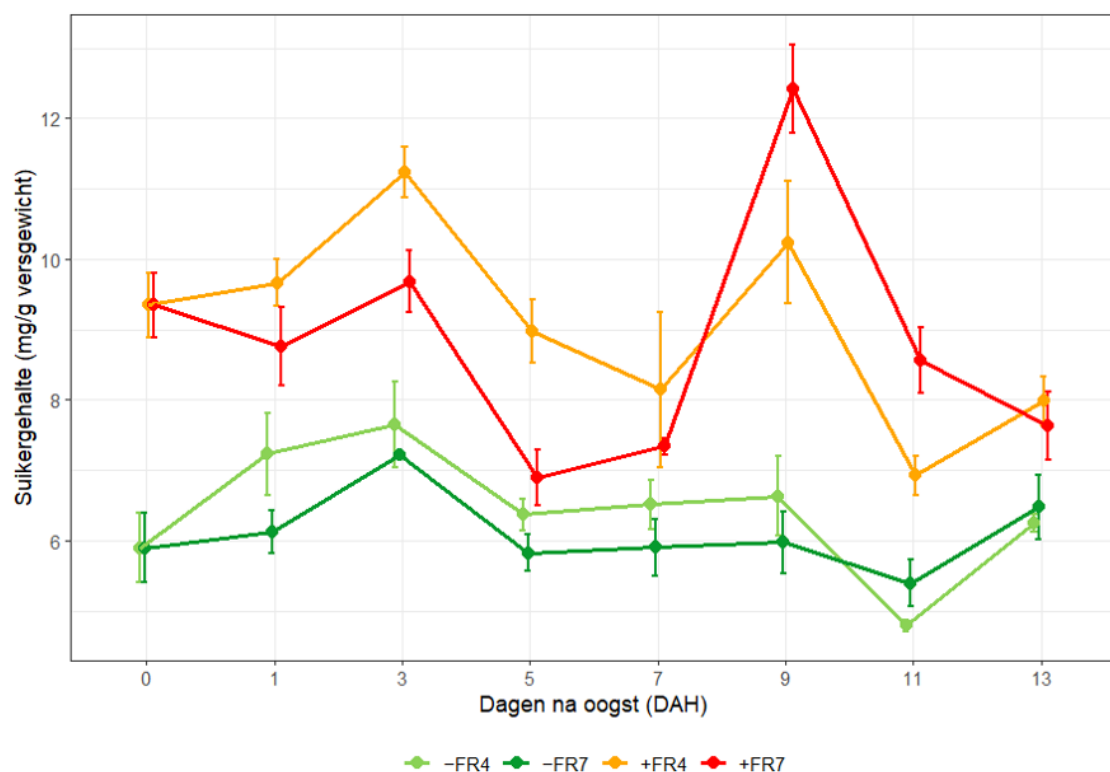
Het toevoegen van verrood licht aan het lichtspectrum vertoonde geen significant effect ( $P = 0,168$ ) op het vitamine C-gehalte op het oogsttijdstip, noch op 7 DAH ( $P = 0,149$ ) (Figuur 21). Op het oogsttijdstip bevatten de planten zonder verrood licht gemiddeld 118,06  $\mu\text{g}$  vitamine C per gram versgewicht en de planten met verrood licht 140,98  $\mu\text{g}$  vitamine C per gram versgewicht. Na zeven dagen bewaring bij 4°C in gemodificeerde atmosfeer was dit gehalte gedaald tot 34,89  $\mu\text{g}$  en 41,57  $\mu\text{g}$  per gram versgewicht, voor de behandeling zonder en met verrood respectievelijk.



Figuur 21: Invloed van verrood licht op het vitamine C-gehalte op de dag van de oogst en 7 dagen na oogsten (DAH). De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De grafieken geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error (SE). De P-waarden, bekomen via de Two-Samples T-test worden eveneens weergegeven in de grafiek voor de dag van de oogst (Dag 0) en 7 dagen na oogsten (Dag 7). Significante waarden worden aangegeven als '\*' voor  $P < 0,05$ ; als '\*\*' voor  $P < 0,01$  en als '\*\*\*' voor  $P < 0,001$ .

Het verloop van het suikergehalte na de oogst voor de verschillende behandelingen wordt weergegeven in [Figuur 22](#). Op 1 DAH, 3 DAH, 9 DAH en 11 DAH werd het suikergehalte zeer significant ( $P < 0,001$ ) beïnvloed door verrood licht. Het suikergehalte werd eveneens op de andere dagen significant beïnvloed maar in minder mate, met  $P < 0,01$  op de dag van de oogst, op 5 DAH en 13 DAH, en met  $P < 0,05$  op 7 DAH. Het toedienen van verrood licht leidde dus tot een significante toename van het suikergehalte.

Het suikergehalte werd ook op sommige dagen significant beïnvloed door de bewaartemperatuur ([Figuur 22](#)). Zo werd de meest significante invloed van de bewaartemperatuur op het suikergehalte teruggevonden op 11 DAH ( $P < 0,01$ ). Bovendien werd ook op 1 DAH, 3 DAH, 5 DAH en 11 DAH een significant effect ( $P < 0,05$ ) ondervonden van de bewaartemperatuur. Op de andere dagen werden geen significante verschillen in suikergehalte waargenomen onder invloed van de bewaartemperatuur. In de eerste instantie lijkt het erop dat een hogere bewaartemperatuur leidt tot een lager suikergehalte, maar vanaf 7 DAH lijkt dit patroon te verdwijnen. De interactie tussen verrood licht en bewaartemperatuur bleek op geen enkel meetmoment significant te zijn.



|                   | 0 DAH            | 1 DAH             | 3 DAH             | 5 DAH            | 7 DAH           | 9 DAH             | 11 DAH            | 13 DAH           |
|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Verrood           | $P = 0,007^{**}$ | $P < 0,001^{***}$ | $P < 0,001^{***}$ | $P = 0,002^{**}$ | $P = 0,027^{*}$ | $P < 0,001^{***}$ | $P < 0,001^{***}$ | $P = 0,004^{**}$ |
| Bewaartemperatuur | /                | $P = 0,047^{*}$   | $P = 0,049^{*}$   | $P = 0,011^{*}$  | $P = 0,253$     | $P = 0,349$       | $P = 0,011^{*}$   | $P = 0,871$      |
| Interactie        | /                | Geen interactie   | Geen interactie   | Geen interactie  | Geen interactie | Geen interactie   | Geen interactie   | Geen interactie  |

*Figuur 22: Invloed van bewaartemperatuur en verrood licht op het suikergehalte tot 13 dagen na oogsten (DAH) op versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer. De behandelingen worden weergegeven als -FR4 (zonder verrood licht, bewaard bij 4°C), -FR7 (zonder verrood licht, bewaard bij 7°C), +FR4 (met verrood licht, bewaard bij 4°C) en +FR7 (met verrood licht, bewaard bij 7°C). De punten op de grafiek geven gemiddelde waarden weer met hun standaard error ( $\pm SE$ ). De P-waarden worden onder de grafiek weergegeven in de tabel en werden bekomen via Two-Way ANOVA ( $n = 3$ ). De P-waarde van de interactie wordt enkel weergegeven indien er interactie was. In de andere gevallen werden de P-waarden bekomen uit het model zonder interactie. Significante waarden worden aangegeven als  $^{*}$  voor  $P < 0,05$ ; als  $^{***}$  voor  $P < 0,01$  en als  $^{****}$  voor  $P < 0,001$ . Op de dag van de oogst (0 DAH) was de P-waarde voor bewaartemperatuur, en dus ook de interactie tussen verrood en bewaartemperatuur, niet relevant. Dit wordt aangegeven met '/'.*

## 5 DISCUSSIE

### 5.1 Experiment 1: Invloed van lichtkwaliteit en plantdichtheid op het voorkomen van rand

#### 5.1.1 Planteigenschappen en rand

In dit onderzoek werd aangetoond dat het toedienen van verrood licht leidde tot een significante toename van drooggewicht, versgewicht, totale bladoppervlakte en kropoppervlakte. Zou et al. (2019) vonden eveneens dat de totale biomassa en de totale bladoppervlakte van groene sla toenamen wanneer verrood werd toegevoegd aan het lichtspectrum. Lee et al. (2015) concludeerden hetzelfde voor rode sla. Uit het onderzoek van Legendre & van Iersel (2021) bleek dat de bladlengte en -breedte, en dus de bladoppervlakte, toenamen wanneer groene sla verrood licht kreeg. Franklin & Whitelam (2007) vermeldde daarentegen dat een verlaagde R/FR-verhouding, en dus een hoger aandeel verrood licht, zou leiden tot een lagere bladoppervlakte van *Arabidopsis thaliana*, *Helianthus annuus* (zonnebloem) en *Vicia faba* (tuinboon). Jin et al. (2021), die zoals in dit onderzoek het effect van verrood licht en plantdensiteit onderzochten, ondervonden ook dat verrood licht de biomassa en bladoppervlakte deed toenemen. Bovendien zagen zij dat het effect van verrood licht groter was bij lage plantdensiteit.

De toename in biomassa, wanneer verrood licht wordt verstrekt, is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan de verhoogde efficiëntie van de fotosynthese onder invloed van verrood licht. Voor een efficiënte fotosynthese is een evenwichtige excitatie van fotosysteem I (PSI) en fotosysteem II (PSII) vereist. Echter, PSI wordt vaak minder geëxciteerd dan PSII. Lange golflengtes, zoals verrood, zullen eerder PSI exciteren en op die manier een excitatie-evenwicht creëren tussen beide fotosystemen. Dit resulteert uiteindelijk in een verbeterde fotosynthese en dus koolstofassimilatie (Zhen & van Iersel, 2017).

Een verklaring voor de verhoogde bladoppervlakte bij toediening van verrood licht, kan teruggevonden worden in de schaduwrespons van planten (Legendre & van Iersel, 2021; Meng et al., 2019). In de schaduw heerst een lage R/FR-verhouding. De hoge proportie verrood licht zorgt voor de inactivatie van fytochroom B en het loskoppelen van fytochroom-interagerende factoren (PIFs - *Phytochrome-Interacting Factors*), die vervolgens accumuleren en leiden tot genexpressie van groeibevorderende genen (Meng et al., 2019).

In dit onderzoek werden significant lagere planteigenschappen van sla geobserveerd bij een verdubbeling van de plantdensiteit. Het onderzoek van Makhadmeh et al. (2017) toonde eveneens bij een verdubbeling van de plantdensiteit een significant lagere biomassa. Toch lijkt een hogere plantdensiteit voordelig te zijn (Maboko & Du Plooy, 2009). Een hogere plantdensiteit levert namelijk een hogere bladoppervlakte en biomassa per oppervlakte-eenheid. Bovendien is een hogere plantdensiteit economisch gezien interessanter, aangezien sla wordt verkocht per stuk en niet per gewicht (Makhadmeh et al., 2017).

Het belangrijkste doel uit het eerste experiment was om te achterhalen hoe het voorkomen van rand wordt beïnvloed door verrood licht en plantdensiteit. Uit de resultaten bleek verrood licht het voorkomen en de ernst van rand significant te doen toenemen. Dit is mogelijks te wijten aan de grotere groeisnelheid (en dus groter gewicht en bladoppervlakte), veroorzaakt door verrood licht. Sago (2016) toonde namelijk aan dat een grotere relatieve groeisnelheid gepaard ging met een hoger aantal bladeren met rand. De plantdensiteit in dit experiment vertoonde daarentegen geen significante invloed op het voorkomen van rand. Cox et al. (1976) daarentegen ondervonden dat een hogere plantdensiteit van sla leidde tot een tragere groei (wat wel werd vastgesteld in dit experiment) en verminderd voorkomen van rand. Echter, ze stelden dat de hogere plantdensiteit ook kleinere planten voortbracht, wat economisch gezien minder gewenst is.

Door de snelle groei ontstaat er in de krop een hogere relatieve vochtigheid waardoor de bladeren slechter kunnen transpireren. Op die manier komt calcium, een immobiel element dat via het xyleem getransporteerd wordt, niet tot aan de bladranden. Hierdoor zullen celwanden hun sterkte verliezen en zal hun inhoud naar de intercellulaire ruimtes lekken (Ertle, 2023; Olle & Bender, 2009; Saure, 1998). Ook melksap zal uit de melksapvaten lekken en leiden tot necrotische verkleuringen (Ertle, 2023). In het kader van dit onderzoek had het interessant kunnen zijn om de calciuminhoud van de bladeren te analyseren om meer inzicht te krijgen in het effect van verrood licht op rand.

### 5.1.2 Pigmenten en nitraten

Uit de resultaten van dit onderzoek bleek dat het toedienen van verrood licht de hoeveelheid pigmenten significant deed afnemen. Liu & van Iersel (2022) toonden aan dat de hoeveelheid chlorofyl afnam met toenemende fotonfluxdensiteit van verrood licht. Ook Zou et al. (2019) observeerden een lagere hoeveelheid chlorofyl wanneer groene sla verrood licht kreeg. Volgens hen was de lagere hoeveelheid chlorofyl te wijten aan de lagere lichtabsorptie. Een lagere hoeveelheid chlorofyl kan een symptoom zijn van het schaduwvermijdingssyndroom (*SAS – Shade Avoidance Syndrome*) (Meng et al., 2019). Een toename in chlorofyl bij een verhoogde R/FR-verhouding is mogelijks te wijten aan het onderdrukken van PIFs en een verminderde chlorofylafbraak (Meng et al., 2019). Het effect van verrood licht op het pigmentgehalte zal afhangen van de slavariëteit (Lee et al., 2019). Zo zagen Lee et al. (2019), zoals in dit onderzoek, een afname van chlorofyl en carotenoïden bij toevoeging van verrood licht voor groene sla. Bij rode sla daarentegen leidde verrood licht tot een toename van deze pigmenten. Hoewel in dit onderzoek voor zowel chlorofyl A en B een significante daling werd waargenomen door toediening van verrood licht, vonden Lee et al. (2019) enkel een significante daling in het chlorofyl A-gehalte.

De plantdensiteit leidde in dit onderzoek niet tot een significante verandering in het pigmentgehalte. Toch zou er verwacht kunnen worden dat door een hogere plantdensiteit de planten trager groeien (wat ook bevestigd werd door het lagere gewicht en bladoppervlakte in dit onderzoek) en minder licht interceperen, waardoor ze minder chlorofyl bezitten. Ghorbani & Neshkari (2021) zagen daarentegen in hun onderzoek dat een hogere plantdensiteit van *Corchorus olitorius* (jute) leidde tot een hoger gehalte chlorofyl A en B. Hierin zullen zeker andere omgevingsfactoren een rol gespeeld hebben aangezien het geen teelt in een gecontroleerde omgeving betrof.

In dit onderzoek werd bovendien vastgesteld dat noch verrood licht, noch plantdensiteit de hoeveelheid nitraten in de sla significant beïnvloedden. Ju et al. (2024) vonden daarentegen dat het toevoegen van verrood licht aan het lightspectrum een vermindering in het nitraatgehalte induceerde. Een lage R/FR-verhouding zou nitraatreductase kunnen onderdrukken, en dus ook de nitraatassimilatie (Lei et al., 2024). Een verhoogde plantdensiteit zou volgens Abu-Rayyan et al. (2004) moeten leiden tot een lager nitraatgehalte omwille van een hogere competitie tussen de planten.

## 5.2 Experiment 2: Invloed van lichtkwaliteit en bewaartemperatuur op de kwaliteit en houdbaarheid van versneden sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer (MAP)

### 5.2.1 Invloed van verrood licht op kwaliteit en houdbaarheid

Het toedienen van verrood licht leidde tot een hogere OVQ-score, zo bleek uit dit onderzoek. Bovendien leidde verrood licht ook tot een hogere respiratiesnelheid, wat doet vermoeden dat deze planten een snellere achteruitgang zouden kennen in OVQ. Nochtans werd het tegenovergestelde waargenomen, namelijk dat de planten die verrood licht kregen trager achteruit gingen dan diegenen die geen verrood licht kregen, bewaard bij dezelfde bewaartemperatuur. In het onderzoek van Zou et al. (2023) werd vastgesteld dat het toedienen van verrood licht geen effect vertoonde op de OVQ wanneer de sla bewaard werd bij 4°C. Bij een bewaartemperatuur van 16°C vonden ze daarentegen dat het toedienen van verrood licht een snellere achteruitgang vertoonde. Dit is enigszins tegenstrijdig met de resultaten van dit onderzoek, waar de OVQ van de behandelingen met verrood licht minder snel daalde. Echter, de sensorische beoordelingen uit dit

onderzoek moeten met een kritische blik benaderd worden, aangezien er slechts twee beoordelaars waren. Voor representatievere beoordelingen zou de sensorische evaluatie idealiter uit een breder beoordelingspanel bestaan en zouden er meer zakjes per dag moeten geopend worden om hier statistische conclusies over te trekken.

Voor de bepaling van de OVQ-score werden parameters als kleur, geur en textuur beoordeeld op een negenpuntige hedonistische schaal. Voor de kleurbeoordeling werden zowel bladkleur als verkleuring van de bladranden in rekening gebracht. Hierbij moet vermeld worden dat de slacultivar Alyssa, geteeld in dit experiment, beschikt over de Knox™ eigenschap, waardoor sla minder snel verkleuring op de bladranden vertoont na versnijding (Rijk Zwaan, n.d.). In dit experiment werd de kleur in alle gevallen hoger gescoord wanneer verrood licht werd toegediend. Meng & Runkle (2019) vonden dat een toediening van verrood licht resulteerde in een lichtere bladkleur en stelden dat de bladkleur positief gecorreleerd is aan de hoeveelheid chlorofyl. Nochtans werd bij de bepaling van pigmenten in dit experiment geen eenduidig effect opgemerkt van verrood licht, noch van bewaartemperatuur. Uit deze resultaten kan dus niet gesteld worden dat bladkleur en chlorofylgehalte gecorreleerd zijn. Het beperkt aandeel beoordelaars in dit experiment kan de reden zijn van het gebrek aan eenduidigheid. Indien een relatie tussen pigmenten en kleur achterhaald wenst te worden, kan de kleur best instrumenteel, en dus objectief, bepaald worden. Daarnaast werd elke dag slechts één zakje per behandeling geopend. Indien er meerdere zakjes per behandeling zouden geanalyseerd worden, zou dit eenduidigere resultaten kunnen opleveren. Dit was echter niet mogelijk in dit onderzoek.

In dit experiment werd de snelste textuurdegradatie waargenomen wanneer geen verrood licht werd toegediend. Toch werd voor de cellekage, een maat voor de beschadiging van de celmembranen (Xiao et al., 2014), geen duidelijk effect onderscheiden tussen de verschillende behandelingen, terwijl er wel verwacht werd dat een hogere cellekage gepaard zou gaan met een snellere textuurdegradatie. Zou et al. (2023) daarentegen namen een hogere elektrolytenlekage waar bij groene sla die verrood licht kreeg. De relatie tussen textuurdegradatie en cellekage zou duidelijker zichtbaar kunnen worden indien een uitgebreider beoordelingspanel de textuurbeoordeling uitvoert en wanneer meer verpakkingen voor de verschillende behandelingen per meetmoment worden geopend. Textuur kan daarnaast ook gekoppeld worden aan de knapperigheid. Een betere knapperigheid (textuur) bij planten die verrood licht krijgen, is mogelijks te wijten aan het hogere suikergehalte die bij deze planten wordt teruggevonden (Van Brenk et al., 2024). Ook in dit onderzoek vertoonden planten die verrood licht kregen zowel een hoger suikergehalte als een betere textuur vanaf de zevende dag na oogsten.

Ook de geur van de sla werd steeds beter gescoord wanneer verrood licht werd toegediend tijdens de groeiperiode. Bij het openen van de zakjes werd initieel een onaangename, zure geur waargenomen, die langzamerhand verminderde, waarschijnlijk door vervluchtiging naar de omgeving. Dit doet uitschijnen dat er tijdens de bewaring bepaalde componenten met een zure geur zich opstapelden in de zakjes. Paillart et al. (2017) onderzochten de sensorische kwaliteit van versneden ijsbergsla, verpakt in gemodificeerde atmosfeer. Zij ondervonden eveneens een zure geur onmiddellijk na het openen van de verpakkingen. Deze zure geur zou volgens hen te wijten zijn aan de accumulatie van azijnzuur en melkzuur, geproduceerd door melkzuurbacteriën zoals *Leuconostoc*. Woltering & Paillart (2024) toonden aan dat doorheen de tijd het aandeel van deze bacteriën in de microbiële populatie toenam op versneden ijsbergsla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer.

De hogere microbiële contaminatie, vastgesteld bij planten die verrood licht kregen, zou aan een snellere degradatie doen denken, en dus snellere afname van OVQ-score. Toch werd het tegenovergestelde in dit onderzoek waargenomen. Ook andere onderzoeken lieten uitschijnen dat verrood licht gepaard gaat met toename van microbiële aanwezigheid. Uit het onderzoek van Schuerger & Brown (1997) bijvoorbeeld bleek dat het toedienen van verrood de ziekteontwikkeling van *Sphaerotheca fuliginea* (echte meeldauw) op komkommer deed toenemen. Courbier et al. (2020) vonden dat verrood licht de hoeveelheid suikers deed toenemen en linkten hieraan een toename van *Botrytis cinerea* (grijze schimmel) symptomen op de tomatenbladeren. De hogere microbiële contaminatie bij planten die verrood licht kregen in dit experiment zou dus gelinkt kunnen worden aan het hogere suikergehalte dat werd vastgesteld wanneer verrood licht

werd toegediend. Zou et al. (2023), Van de Velde et al. (2023) en Van Brenk et al. (2024) vonden eveneens dat het toedienen van verrood licht leidde tot planten met hogere suikergehaltes. Deze hogere suikergehaltes kunnen mogelijks te wijten zijn aan de verhoogde fotosynthetische efficiëntie door verrood licht (Zhen & van Iersel, 2017).

Hoewel in dit onderzoek lijkt dat verrood licht het vitamine C-gehalte doet toenemen, waren verschillen in gehalten tussen de verschillende lichtbehandelingen (-FR en +FR) niet significant. Yan et al. (2023) onderzochten het effect van additionele belichting in de kasteelt van sla. Ze zagen geen significant verschil in vitamine C-gehalte tussen de verschillende additionele lichtbehandelingen (wit licht, wit licht met UV-licht, wit licht met verrood licht, wit licht met zowel UV-licht als verrood licht). Alrajhi et al. (2023) vonden daarentegen dat een lichtbehandeling met rood, blauw, groen en verrood licht resulteerde in het hoogste vitamine C gehalte vergeleken met de andere lichtbehandelingen (wit licht, combinaties van rood en blauw licht, wit licht met UV-licht). Een hoger vitamine C-gehalte bij toediening van verrood licht zou gelinkt kunnen zijn aan het hoger suikergehalte dat geobserveerd wordt bij planten die verrood licht kregen. Bepaalde suikers, zoals D-mannose en L-galactose zijn namelijk efficiënte precursoren voor vitamine C-synthese (Wheeler et al., 1998).

### 5.2.2 Invloed van bewaartemperatuur op kwaliteit en houdbaarheid

Over het algemeen deed een hogere bewaartemperatuur (7°C) de OVQ-score afnemen. Eveneens voor kleur, geur en textuur leidde een hogere bewaartemperatuur vaak tot een lagere score. Deze lagere scores zouden opnieuw gelinkt kunnen worden aan de respiratiesnelheid, aangezien een hogere respiratiesnelheid wordt verwacht bij een toenemende bewaartemperatuur. Echter, in dit experiment werd geen significante toename in respiratiesnelheid waargenomen bij een hogere bewaartemperatuur. Het onderzoek van Manolopoulou et al. (2010) daarentegen toonde een hogere respiratiesnelheid aan bij een bewaartemperatuur van 5°C in vergelijking met 0°C. De afname in OVQ-score in functie van de bewaartemperatuur werd ook waargenomen in het onderzoek van Xiao et al. (2014) voor microgreens.

De bewaartemperatuur vertoonde op geen enkel tijdstip een significant effect op de cellekkage. Manolopoulou et al. (2010) stelden eveneens dat er geen significant effect was van bewaartemperatuur op de stevigheid van de bladeren. Ook voor microgreens van radijzen werd geen effect van bewaartemperatuur op cellekkage waargenomen (Xiao et al., 2014). Nochtans werd in dit onderzoek een lagere score gegeven aan textuur indien de sla bewaard werd bij 7°C in plaats van 4°C. Dit temperatuureffect was voornamelijk op te merken bij de planten die verrood licht kregen. Er zou verwacht worden dat textuurverlies bij hogere temperaturen gelinkt is aan meer vochtverlies door toenemende transpiratie en meer verlies van drooggewicht door toenemende respiratie (Taniwaki et al., 2009), hoewel de respiratiesnelheid in dit experiment niet significant werd beïnvloed door de bewaartemperatuur.

Net als bij de cellekkage werd voor de hoeveelheid pigmenten geen eenduidig significant effect opgemerkt van de bewaartemperatuur. Meestal wordt een daling van het chlorofylgehalte waargenomen binnen de eerste vijf dagen na de oogst, maar grote variaties, zoals in dit onderzoek, zijn mogelijk (Spinardi & Ferrante, 2012). Zou et al. (2023) vonden dat zowel het chlorofyl- als het carotenoïdengehalte constant bleef bij een bewaartemperatuur van 4°C. Indien de bewaartemperatuur werd opgedreven tot 16°C merkten zij daarentegen een duidelijke daling in pigmentgehalte. Spinardi & Ferrante (2012) bekeken het effect van de bewaartemperatuur (4°C en 10°C) op het chlorofyl- en carotenoïdengehalte doorheen de tijd voor *baby leaf* sla. In hun onderzoek bleef de hoeveelheid van beide pigmenten constant, onafhankelijk van de bewaartemperatuur. Xiao et al. (2014) toonden daarentegen dat voor microgreens het chlorofylgehalte afnam met toenemende bewaartemperatuur. Zij stelden dat een toename in temperatuur het metabolisme versnelde, waardoor chlorofylafbraak toenam.

Volgens Spinardi & Ferrante (2012) is de hoeveelheid suikers negatief gecorreleerd met de respiratiesnelheid. Doordat suikers een energiereserve zijn en respiratie suikers verbruikt, zal een hogere respiratiesnelheid leiden tot een lager suikergehalte. In dit experiment konden tot vijf dagen na de oogst significant lagere suikergehaltes worden waargenomen voor de versneden sla die bewaard werd bij 7°C. De bewaartemperatuur had echter geen significante invloed op de respiratiesnelheid. Een verklaring voor het verschil in suikerhoeveelheden zou dus elders moeten liggen.

De lagere microbiële contaminatie bij een bewaartemperatuur van 4°C kan eveneens gelinkt worden aan de hogere suikergehaltes. Doordat de micro-organismen minder snel groeien bij een lagere temperatuur zullen ze minder suiker verbruiken, wat de hogere suikergehaltes bij deze temperaturen kan verklaren. Xiao et al. (2014) vonden dat de bewaartemperatuur positief gecorreleerd was met de microbiële groeisnelheid. Aerobe mesofiele bacteriën groeiden in hun onderzoek sneller bij 10°C in vergelijking met 1°C en 5°C. In het onderzoek van Caldera & Franzetti (2014) daarentegen werd een kleine toename in het totaal aantal bacteriën waargenomen op sla, verpakt onder gemodificeerde atmosfeer, bij een bewaartemperatuur van 10°C vergeleken met 4°C. De toename was echter niet groot genoeg om een significant effect van de bewaartemperatuur te concluderen.

## 6 CONCLUSIE

In het kader van dit masterthesisonderzoek werd onderzocht hoe verrood licht en de plantdensiteit het voorkomen en de ernst van rand beïnvloeden. Daarnaast werd het effect van verrood licht en bewaartemperatuur op de kwaliteit en houdbaarheid van versneden sla, verpakt in gemodificeerde atmosfeer, nagegaan. De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat verrood licht zowel gewenste als minder gewenste effecten vertoont. Dergelijke lange golflengtes kunnen interessant zijn om de opbrengst (biomassa en bladoppervlakte) te doen toenemen, maar wel ten koste van de kwaliteit aangezien het voorkomen en de ernst van rand dan toenemen. Een hogere plantdensiteit bleek eveneens gunstig voor de opbrengst en beïnvloedde het voorkomen van rand in dit experiment niet. Andere onderzoeken lieten nochtans uitschijnen dat door een hogere plantdensiteit het voorkomen van rand zou verminderen. Meer onderzoek is vereist om het effect van de interactie tussen plantdensiteit en verrood licht op rand te begrijpen.

Het effect van verrood licht op de naaogstkwaliteit en houdbaarheid van sla bleek eveneens tweezijdig. Enerzijds deden de hogere microbiële contaminatie en respiratie vermoeden dat de houdbaarheid van sla, die verrood licht kreeg, zou afnemen. De organoleptische beoordeling daarentegen toonde aan dat het toedienen van verrood licht de kwaliteit en houdbaarheid deed toenemen. Hier moet echter vermeld worden dat de beoordeling in dit onderzoek door slechts twee personen werd uitgevoerd, wat beperkend is om duidelijke conclusies te trekken.

De bewaartemperatuur verlagen is een goede strategie voor het behouden van de kwaliteit en een langere houdbaarheid te garanderen. Een bewaartemperatuur van 4°C, in plaats van 7°C, verminderde de microbiële contaminatie en zorgde voor een tragere achteruitgang in kwaliteit, zoals blijkt uit de OVQ-score. De invloed van de bewaartemperatuur op de respiratiesnelheid werd in dit onderzoek niet waargenomen. Het toedienen van verrood licht tijdens de groeiperiode en het bewaren bij een bewaartemperatuur van 4°C bleek uit dit onderzoek de beste optie voor een goede naaogstkwaliteit en houdbaarheid.

In de toekomst zal meer onderzoek vereist zijn om de samenhang van de verschillende parameters, die een invloed hebben op naaogstkwaliteit en houdbaarheid, te achterhalen. Ook voor het bepalen van de ideale samenstelling van lichtspectra voor optimale groei, kwaliteit en houdbaarheid is meer onderzoek nodig.

## 7 REFERENTIES

- Abbas, M., Saeed, F., Anjum, F. M., Afzaal, M., Tufail, T., Bashir, M. S., Ishtiaq, A., Hussain, S., & Suleria, H. A. R. (2017). Natural polyphenols: An overview. *International Journal of Food Properties*, 20(8), 1689–1699. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1220393>
- Abu-Rayyan, A., Kharawish, B. H., & Al-Ismaïl, K. (2004). Nitrate content in lettuce (*Lactuca sativa* L.) heads in relations to plant spacing, nitrogen form and irrigation level. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(9), 931–936. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1733>
- Agüero, M. V., Barg, M. V., Yommi, A., Camelo, A., & Roura, S. I. (2008). Postharvest changes in water status and chlorophyll content of lettuce (*Lactuca Sativa* L.) and their relationship with overall visual quality. *Journal of Food Science*, 73(1), S47–S55. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00604.x>
- Alconero, R. (1988). Lettuce (*Lactuca sativa* L.). In *Crops II* (Vol. 6, pp. 351–369). Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ali, M. B., Khandaker, L., Oba, S., & Rastilantie, M. (2009). Comparative study on functional components, antioxidant activity and color parameters of selected colored leafy vegetables as affected by photoperiods. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(3–4), 392–398.
- Al-Kodmany, K. (2016). Sustainable tall buildings: cases from the global south. *International Journal of Architectural Research*, 10(2), 52–66.
- Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. *Buildings*, 8(2), 24. <https://doi.org/10.3390/buildings8020024>
- Allende, A., & Artés, F. (2003). UV-C radiation as a novel technique for keeping quality of fresh processed “Lollo Rosso” lettuce. *Food Research International*, 36(7), 739–746. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(03\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(03)00054-1)
- Alrajhi, A. A., Alsahli, A. S., Alhelal, I. M., Rihan, H. Z., Fuller, M. P., Alsadon, A. A., & Ibrahim, A. A. (2023). The Effect of LED Light Spectra on the Growth, Yield and Nutritional Value of Red and Green Lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/plants12030463>
- Ares, G., Lareo, C., & Lema, P. (2008). Sensory shelf life of butterhead lettuce leaves in active and passive modified atmosphere packages. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(9), 1671–1677. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01736.x>
- Ares, G., & Varela, P. (2017). Trained vs. consumer panels for analytical testing: Fueling a long lasting debate in the field. *Food Quality and Preference*, 61, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.10.006>
- Arnon, D. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1.
- ASTM International. (1997). *Standard Practice for Serving Protocol for Sensory Evaluation of Foods and Beverages*.
- Barrett, D. M., Beaulieu, J. C., & Shewfelt, R. (2010). Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: Desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 369–389. <https://doi.org/10.1080/10408391003626322>
- Beaudry, R. M. (2000). Responses of Horticultural Commodities to Low Oxygen: Limits to the Expanded Use of Modified Atmosphere Packaging. *HortTechnology*, 10(3), 491–500.
- Birkby, J. (2016). Vertical farming. *ATTRA Sustainable Agriculture*, 2, 1–12.
- Caldera, L., & Franzetti, L. (2014). Effect of storage temperature on the microbial composition of ready-to-use vegetables. *Current Microbiology*, 68(2), 133–139. <https://doi.org/10.1007/s00284-013-0430-6>
- Camejo, D., Frutos, A., Mestre, T. C., del Carmen Piñero, M., Rivero, R. M., & Martínez, V. (2020). Artificial light impacts the physical and nutritional quality of lettuce plants. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 61(1), 69–82. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00191-z>
- Cantliffe, D. J. (1972). Nitrate Accumulation in Spinach Grown Under Different Light Intensities. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 97(2), 152–154.
- Cataldo, D. A., Maroon, M., Schrader, L. E., & Youngs, V. L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71–80.

- Chadwick, M., Gawthrop, F., Michelmores, R. W., Wagstaff, C., & Methven, L. (2016). Perception of bitterness, sweetness and liking of different genotypes of lettuce. *Food Chemistry*, 197, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.105>
- Charles, F., Nilprapruck, P., Roux, D., & Sallanon, H. (2018). Visible light as a new tool to maintain fresh-cut lettuce post-harvest quality. *Postharvest Biology and Technology*, 135, 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.08.024>
- Chen, X. li, Li, Y. li, Wang, L. chun, & Guo, W. zhong. (2021). Red and blue wavelengths affect the morphology, energy use efficiency and nutritional content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientific Reports*, 11(1), 8374. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87911-7>
- Chiesa, A., Seija, E., Moccia, S. N., & Frezza, D. (2004). Fresh Cut Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Quality as Affected by Packaging Material. *European Journal of Horticultural Science*, 1, 1611–4426.
- Christiaens, A., De Keyser, E., Lootens, P., Pauwels, E., Roldán-Ruiz, I., De Riek, J., Gobin, B., & Van Labeke, M. C. (2015). Cold storage to overcome dormancy affects the carbohydrate status and photosynthetic capacity of *Rhododendron simsii*. *Plant Biology*, 17(1), 97–105. <https://doi.org/10.1111/plb.12195>
- Colonna, E., Roupael, Y., Barbieri, G., & De Pascale, S. (2016). Nutritional quality of ten leafy vegetables harvested at two light intensities. *Food Chemistry*, 199, 702–710. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.068>
- Courbier, S., Grevink, S., Sluijs, E., Bonhomme, P.-O., Kajala, K., Van Wees, S. C. M., & Pierik, R. (2020). Far-red light enhances soluble sugar levels and *Botrytis cinerea* disease development in tomato leaves in a jasmonate-dependent manner. *Plant, Cell & Environment*, 43(11), 2769–2781. <https://doi.org/10.1101/2020.05.25.114439>
- Cox, E. F., McKee, J. M. T., & Dearman, A. S. (1976). The Effect of Growth Rate on Tipburn Occurrence in Lettuce. *Journal of Horticultural Science*, 57(3), 297–309. <https://doi.org/10.1080/00221589.1976.11514693>
- Curvers, K., Seifi, H., Mouille, G., de Rycke, R., Asselbergh, B., Van Hecke, A., Vanderschaeghe, D., Höfte, H., Callewaert, N., Van Breusegem, F., & Höfte, M. (2010). Absciscic acid deficiency causes changes in cuticle permeability and pectin composition that influence tomato resistance to *Botrytis cinerea*. *Plant Physiology*, 154(2), 847–860. <https://doi.org/10.1104/pp.110.158972>
- Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Le Gourrier, J., Pelleschi-Travier, S., Crespel, L., Morel, P., Huché-Théliér, L., Boumaza, R., Vian, A., Guérin, V., Leduc, N., & Sakr, S. (2016). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 4–21. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>
- Djekic, I., Lorenzo, J. M., Muneakata, P. E. S., Gagaoua, M., & Tomasevic, I. (2021). Review on characteristics of trained sensory panels in food science. *Journal of Texture Studies*, 52(4), 501–509. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12616>
- Dodson, K. Y., Young, E. R., & Soliman, A. G. M. (1992). Determination of total vitamin C in various food matrices by liquid chromatography and fluorescence detection. *Journal of AOAC International*, 75(5), 887–890.
- Dou, H., Niu, G., Gu, M., & Masabni, J. G. (2017). Effects of light quality on growth and phytonutrient accumulation of herbs under controlled environments. *Horticulturae*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020036>
- Dutta Gupta, S., & Agarwal, A. (2017). Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. In S. Dutta Gupta (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture* (pp. 1–25). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_1)
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2010). Scientific Opinion on possible health risks for infants and young children from the presence of nitrates in leafy vegetables. *EFSA Journal*, 8(12), 1935. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1935>
- Ertle, J. M. (2023). *Tipburn Management Through Controlled Environment for Indoor Vertical Farm Lettuce Production* [Doctoral dissertation]. The Ohio State University.
- Faisal, M., & Anis, M. (2009). Changes in photosynthetic activity, pigment composition, electrolyte leakage, lipid peroxidation, and antioxidant enzymes during ex vitro establishment of micropropagated *Rauwolfia tetraphylla* plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 99(2), 125–132. <https://doi.org/10.1007/s11240-009-9584-0>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression* (3rd ed.). Sage. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

- Franklin, K. A., & Whitelam, G. C. (2007). Red: far-red ratio perception and shade avoidance. In *Annual Plant Reviews Volume 30: Light and Plant Development* (pp. 211–234).
- Fruit Logistica. (2020). *European Statistics Handbook*. Messe Berlin GmbH. [https://www.fruitlogistica.com/FRUIT-LOGISTICA/Downloads-Alle-Sprachen/Auf-einen-Blick/European\\_Statistics\\_Handbook\\_2020.pdf](https://www.fruitlogistica.com/FRUIT-LOGISTICA/Downloads-Alle-Sprachen/Auf-einen-Blick/European_Statistics_Handbook_2020.pdf)
- Ghorbani, M. H., & Neshkari, A. P. (2021). Effect of Year, Planting Date and Plant Density on Yield, Nutrients and Photosynthetic Pigments in Leaves of Azivash (*Corchorus Olitorius* L.). *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(6), 20132–20147. <http://annalsofrscb.ro>
- Gillani, S. A., Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). Comparison of Energy-use Efficiency for Lettuce Plantation under Nutrient Film Technique and Deep-Water Culture Hydroponic Systems. *Procedia Computer Science*, 217, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.197>
- Gómez, C., & Jiménez, J. (2020). Effect of end-of-production high-energy radiation on nutritional quality of indoor-grown red-leaf lettuce. *HortScience*, 55(7), 1055–1060. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI115030-20>
- Gross, K. C., Wang, Y., & Saltveit, M. (2016). *The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks* (pp. 386–389). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Gude, K., Talavera, M., Sasse, A. M., Rivard, C. L., & Pliakoni, E. (2021). Effect of light characteristics on the sensory properties of red lettuce (*Lactuca sativa*). *Foods*, 10(11), 2660. <https://doi.org/10.3390/foods10112660>
- Hamza, A., Abdelraouf, R. E., Helmy, Y. I., & El-Sawy, S. M. M. (2022). Using deep water culture as one of the important hydroponic systems for saving water, mineral fertilizers and improving the productivity of lettuce crop. *International Journal of Health Sciences*, 6(59), 2311–2331. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns9.12932>
- Holmes, M. G., & Smith, H. (1977). The function of phytochrome in the natural environment—I. Characterization of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism. *Photochemistry and Photobiology*, 25(6), 533–538.
- Hooks, T., Masabni, J., Sun, L., & Niu, G. (2021). Effect of pre-harvest supplemental uv-a/blue and red/blue led lighting on lettuce growth and nutritional quality. *Horticulturae*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7040080>
- Jackson, S. D. (2009). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, 181(3), 517–531. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02681.x>
- Jacxsens, L., Devlieghere, F., & Debevere, J. (1999). Validation of a Systematic Approach to Design Equilibrium Modified Atmosphere Packages for Fresh-Cut Produce. *LWT-Food Science and Technology*, 32(7), 425–432.
- Jin, W., Ji, Y., Larsen, D. H., Huang, Y., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2023). Gradually increasing light intensity during the growth period increases dry weight production compared to constant or gradually decreasing light intensity in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111807>
- Jin, W., Urbina, J. L., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2021). Adding Far-Red to Red-Blue Light-Emitting Diode Light Promotes Yield of Lettuce at Different Planting Densities. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609977>
- Ju, J., Zhang, S., Hu, Y., Zhang, M., He, R., Li, Y., Liu, X., & Liu, H. (2024). Effects of Supplemental Red and Far-Red Light at Different Growth Stages on the Growth and Nutritional Properties of Lettuce. *Agronomy*, 14(1), 55. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010055>
- Kader, A. A., Lip, W. J., & Morris, L. L. (1973). Systems for Scoring Quality of Harvested Lettuce. *HortScience*, 8(5), 408–409.
- Kami, C., Lorrain, S., Hornitschek, P., & Fankhauser, C. (2010). Light-regulated plant growth and development. *Current Topics in Developmental Biology*, 91, 29–66. [https://doi.org/10.1016/S0070-2153\(10\)91002-8](https://doi.org/10.1016/S0070-2153(10)91002-8)
- Kang, W. H., Park, J. S., Park, K. S., & Son, J. E. (2016). Leaf photosynthetic rate, growth, and morphology of lettuce under different fractions of red, blue, and green light from light-emitting diodes (LEDs). *Horticulture Environment and Biotechnology*, 57(6), 573–579. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0093-x>
- Kassambara, A. (2023). *gpubr: Gaussian Process in R for Single and Multi-Response Optimization*. <https://CRAN.R-project.org/package=gpubr>
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., & Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>

- Kobayashi, Y., Kotilainen, T., Carmona-García, G., Leip, A., & Tuomisto, H. L. (2022). Vertical farming: A trade-off between land area need for crops and for renewable energy production. *Journal of Cleaner Production*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134507>
- Kozuki, A., Ishida, Y., Kakibuchi, K., Mishima, T., Sakurai, N., Murata, Y., Nakano, R., Ushijima, K., & Kubo, Y. (2015). Effect of postharvest short-term radiation of near infrared light on transpiration of lettuce leaf. *Postharvest Biology and Technology*, 108, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.05.010>
- Kusuma, P., & Bugbee, B. (2021). Improving the Predictive Value of Phytochrome Photoequilibrium: Consideration of Spectral Distortion Within a Leaf. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.596943>
- Lareo, C., Ares, G., Ferrando, L., Lema, P., GÁmbaro, A., & Soubes, M. (2009). Influence of temperature on shelf life of butterhead lettuce leaves under passive modified atmosphere packaging. *Journal of Food Quality*, 32(2), 240–261. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2009.00248.x>
- Lee, M. J., Park, S. Y., & Oh, M. M. (2015). Growth and cell division of lettuce plants under various ratios of red to far-red light-emitting diodes. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 56(2), 186–194. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0130-1>
- Lee, M., Xu, J., Wang, W., & Rajashekar, C. B. (2019). The Effect of Supplemental Blue, Red and Far-Red Light on the Growth and the Nutritional Quality of Red and Green Leaf Lettuce. *American Journal of Plant Sciences*, 10(12), 2219–2235. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.1012157>
- Legendre, R., & van Iersel, M. W. (2021). Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: Disentangling morphological and physiological effects. *Plants*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/plants10010166>
- Lei, C., & Engeseth, N. J. (2021). Comparison of growth characteristics, functional qualities, and texture of hydroponically grown and soil-grown lettuce. *LWT*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111931>
- Lei, K., Hu, H., Chang, M., Sun, C., Ullah, A., Yu, J., Dong, C., Gao, Q., Jiang, D., Cao, W., Tian, Z., & Dai, T. (2024). A low red/far-red ratio restricts nitrogen assimilation by inhibiting nitrate reductase associated with downregulated TaNR1.2 and upregulated TaPIL5 in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107850>
- Lichtenthaler, K. H. (1987). Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382.
- Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W., & Yang, C. M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 150, 86–91. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>
- Liu, J., & van Iersel, M. W. (2022). Far-Red Light Effects on Lettuce Growth and Morphology in Indoor Production Are Cultivar Specific. *Plants*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/plants11202714>
- Llorach, R., Martínez-Sánchez, A., Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., & Ferreres, F. (2008). Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry*, 108(3), 1028–1038. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.032>
- Lonchamp, J., Barry-Ryan, C., & Devereux, M. (2009). Identification of volatile quality markers of ready-to-use lettuce and cabbage. *Food Research International*, 42(8), 1077–1086. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.05.002>
- Lubna, F. A., Lewus, D. C., Shelford, T. J., & Both, A. J. (2022). What You May Not Realize about Vertical Farming. *Horticulturae*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8040322>
- Maboko, M. M., & Du Plooy, C. P. (2009). Effect of plant spacing on growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a soilless production system. *South African Journal of Plant and Soil*, 26(3), 195–198. <https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639954>
- Magnuson, J. A., King, A. D., Torok, T., King, D., Goodman, N., & Food Sci, J. (1990). Microflora of Partially Processed Lettuce. *Applied and Environmental Microbiology*, 56(12), 3851–3854.
- Makhadmeh, I. M., Al Tawaha, A. R., Edaroyati, P., Al-Karaki, G., & Hassan, S. A. (2017). Effects of different growth media and planting densities on growth of lettuce grown in a closed soilless system. *Research on Crops*, 18(2), 294–298. <https://doi.org/10.5958/2348-7542.2017.00050.X>

- Mangiafico, & Savatore, S. (2024). *rcompanion: Functions to Support Extension Education Program Evaluation*. Rutgers Cooperative Extension. <https://CRAN.R-project.org/package=rcompanion>
- Mannheim, B. (1980). *Methods of enzymatic food analysis*. Boehringer Mannheim.
- Manolopoulou, H., Lambrinos, G. R., Chatzis, E., Xanthopoulos, G., & Aravantinos, E. (2010). Effect of temperature and modified atmosphere packaging on storage quality of fresh-cut romaine lettuce. *Journal of Food Quality*, *33*, 317–336. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2010.00321.x>
- Martínez, I., Ares, G., & Lema, P. (2008). Influence of cut and packaging film on sensory quality of fresh-cut butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L., cv. Wang). *Journal of Food Quality*, *31*(1), 48–66. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2007.00183.x>
- Martínez-Ispizua, E., Calatayud, Á., Marsal, J. I., Basile, F., Cannata, C., Abdelkhalik, A., Soler, S., Valcárcel, J. V., & Martínez-Cuenca, M. R. (2022). Postharvest Changes in the Nutritional Properties of Commercial and Traditional Lettuce Varieties in Relation with Overall Visual Quality. *Agronomy*, *12*(2), 403. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020403>
- Matysiak, B., Kaniszewski, S., Dyśko, J., Kowalczyk, W., Kowalski, A., & Grzegorzewska, M. (2021). The impact of led light spectrum on the growth, morphological traits, and nutritional status of 'elizium' romaine lettuce grown in an indoor controlled environment. *Agriculture*, *11*, 1133. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111133>
- Medina-Lozano, I., Bertolín, J. R., & Díaz, A. (2021). Nutritional value of commercial and traditional lettuce (*Lactuca sativa* L.) and wild relatives: Vitamin C and anthocyanin content. *Food Chemistry*, *359*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129864>
- Meng, L., Mestdag, H., Ameye, M., Audenaert, K., Höfte, M., & Van Labeke, M. C. (2020). Phenotypic Variation of Botrytis cinerea Isolates Is Influenced by Spectral Light Quality. *Frontiers in Plant Science*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01233>
- Meng, Q., Kelly, N., & Runkle, E. S. (2019). Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*, *162*, 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.016>
- Meng, Q., & Runkle, E. S. (2019). Far-red radiation interacts with relative and absolute blue and red photon flux densities to regulate growth, morphology, and pigmentation of lettuce and basil seedlings. *Scientia Horticulturae*, *255*, 269–280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.030>
- Min, Q., Marcelis, L. F. M., Nicole, C. C. S., & Woltering, E. J. (2021). High Light Intensity Applied Shortly Before Harvest Improves Lettuce Nutritional Quality and Extends the Shelf Life. *Frontiers in Plant Science*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.615355>
- Moghim, F. (2021). Vertical Farming Economics in 10 Minutes. *Rutgers Business Review*, *6*(1), 122–131.
- Mohammad, Z. H., Prado, I. do, & Sirsat, S. A. (2022). Comparative microbial analyses of hydroponic versus in-soil grown Romaine lettuce obtained at retail. *Heliyon*, *8*(10), e11050. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11050>
- Mohammed, S. B., & Sookoo, R. (2016). Nutrient Film Technique for Commercial Production. *Agricultural Science Research Journal*, *6*(11), 269–274.
- Nguyen, T. K. L., Cho, K. M., Lee, H. Y., Cho, D. Y., Lee, G. O., Jang, S. N., Lee, Y., Kim, D., & Son, K. H. (2021). Effects of white led lighting with specific shorter blue and/or green wavelength on the growth and quality of two lettuce cultivars in a vertical farming system. *Agronomy*, *11*, 2111. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112111>
- Noumedem, J. A. K., Djeussi, D. E., Hritcu, L., Mihasan, M., & Kuete, V. (2017). *Lactuca sativa*. In *Medicinal Spices and Vegetables from Africa* (pp. 437–449). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809286-6.00020-0>
- Ohtake, N., Ishikura, M., Suzuki, H., Yamori, W., & Goto, E. (2018). Continuous irradiation with alternating red and blue light enhances plant growth while keeping nutritional quality in lettuce. *HortScience*, *53*(12), 1804–1809. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13469-18>
- O'Leary, B. M., & Plaxton, W. C. (2016). Plant Respiration. *ELS*, 1–11. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0001301.pub3>
- Olle, M., & Bender, I. (2009). Causes and control of calcium deficiency disorders in vegetables: a review. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, *84*(6), 577–584.

- Paillart, M. J. M., van der Vossen, J. M. B. M., Levin, E., Lommen, E., Otma, E. C., Snels, J. C. M. A., & Woltering, E. J. (2017). Bacterial population dynamics and sensorial quality loss in modified atmosphere packed fresh-cut iceberg lettuce. *Postharvest Biology and Technology*, 124, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.10.008>
- Panawala, L. (2017). *Difference Between Chlorophyll A and B*. <https://www.researchgate.net/publication/316584030>
- Peng, H., Sthapit Kandel, J., Micheltore, R. W., & Simko, I. (2020). Identification of Factors Affecting the Deterioration Rate of Fresh-Cut Lettuce in Modified Atmosphere Packaging. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 1997–2011. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02538-2/Published>
- Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z>
- Rijk Zwaan. (n.d.). *ALYSSA RZ*. Retrieved May 19, 2024, from <https://www.rijkwaaan.nl/groentezaden/sla/alyssa-rz-prdLS11094-ctgCrops.lettuce>
- Roberts, J. M., Bruce, T. J. A., Monaghan, J. M., Pope, T. W., Leather, S. R., & Beacham, A. M. (2020). Vertical farming systems bring new considerations for pest and disease management. *Annals of Applied Biology*, 176(3), 226–232. <https://doi.org/10.1111/aab.12587>
- Rodriguez-Concepcion, M., Avalos, J., Bonet, M. L., Boronat, A., Gomez-Gomez, L., Hornero-Mendez, D., Limon, M. C., Meléndez-Martínez, A. J., Olmedilla-Alonso, B., Palou, A., Ribot, J., Rodrigo, M. J., Zacarias, L., & Zhu, C. (2018). A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health. *Progress in Lipid Research*, 70, 62–93. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2018.04.004>
- Runkle, E. (2007, June). Light Quality Defined. *Greenhouse Product News*, 82.
- Sager, J. C., Smith, W. O., Edwards, J. L., & Cyr, K. L. (1988). Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data. *Transactions of the ASAE*, 31(6), 1882–1889.
- Sago, Y. (2016). Effects of light intensity and growth rate on tipburn development and leaf calcium concentration in butterhead lettuce. *HortScience*, 51(9), 1087–1091. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI10668-16>
- Saure, M. C. (1998). Causes of the tipburn disorder in leaves of vegetables. *Scientia Horticulturae*, 76, 131–147.
- Schuerger, A. C., & Brown, C. S. (1997). Spectral Quality Affects Disease Development of Three Pathogens on Hydroponically Grown Plants. *HortScience*, 32(1), 96–100.
- Smyth, A. B., Song, J., & Cameron, A. C. (1998). Modified Atmosphere Packaged Cut Iceberg Lettuce: Effect of Temperature and O<sub>2</sub> Partial Pressure on Respiration and Quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(11), 4556–4562. <https://doi.org/10.1021/jf980208s>
- Soltani Firouz, M., Alimardani, R., Mobli, H., & Mohtasebi, S. S. (2021). Effect of modified atmosphere packaging on the mechanical properties of lettuce during shelf life in cold storage. *Information Processing in Agriculture*, 8(4), 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.12.005>
- Spinardi, A., & Ferrante, A. (2012). Effect of storage temperature on quality changes of minimally processed baby lettuce. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(1), 38–42.
- Statbel. (2022). *Landbouwcijfers 2022*. <https://statbel.fgov.be/nl/themas/landbouw-visserij/land-en-tuinbouwbedrijven#figures>
- Taniwaki, M., Takahashi, M., Sakurai, N., Takada, A., & Nagata, M. (2009). Effects of harvest time and low temperature storage on the texture of cabbage leaves. *Postharvest Biology and Technology*, 54(2), 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.06.004>
- Thomas, T., Biradar, M. S., Chimmad, V. P., & Janagoudar, B. S. (2021). Growth and physiology of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars under different growing systems. *Plant Physiology Reports*, 26(3), 526–534. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00591-3>
- Tournas, V. H. (2005). Spoilage of Vegetable Crops by Bacteria and Fungi and Related Health Hazards. *Critical Reviews in Microbiology*, 31, 33–44.

- United Nations. (2017). *World Population Prospects 2017 – Data Booklet (ST/ESA/SER.A/401)*.  
[https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2020/Jan/un\\_2017\\_world\\_population\\_prospects-2017\\_revision\\_databooklet.pdf](https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/files/documents/2020/Jan/un_2017_world_population_prospects-2017_revision_databooklet.pdf)
- Urbanavičiūtė, A., Pinho, P., Samuolienė, G., Duchovskis, P., Vitta, P., Stonkus, A., Tamulaitis, G., Pukauskas, A., & Halonen, L. (2007). Effect of short-wavelength light on lettuce growth and nutritional quality. *Sodininkystė Ir Daržininkystė*, 26(1), 157–165.
- Van Brenk, J. B., Courbier, S., Kleijweg, C. L., Verdonk, J. C., & Marcelis, L. F. M. (2024). Paradise by the far-red light: Far-red and red:blue ratios independently affect yield, pigments, and carbohydrate production in lettuce, *Lactuca sativa*. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1383100>
- Van de Velde, E., Steppe, K., & Van Labeke, M. C. (2023). Leaf morphology, optical characteristics and phytochemical traits of butterhead lettuce affected by increasing the far-red photon flux. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1129335>
- van Delden, S. H., SharathKumar, M., Butturini, M., Graamans, L. J. A., Heuvelink, E., Kacira, M., Kaiser, E., Klammer, R. S., Klerkx, L., Kootstra, G., Loeber, A., Schouten, R. E., Stanghellini, C., van Ieperen, W., Verdonk, J. C., Violet-Chabrand, S., Woltering, E. J., van de Zedde, R., Zhang, Y., & Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food*, 2(12), 944–956. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w>
- van Iersel, M. W. (2017). Optimizing LED Lighting in Controlled Environment Agriculture. In S. Dutta Gupta (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture* (pp. 59–80). Springer.
- Vandenbogaerde, E. (2021). *Alternatieve beheersing van Phytophthora cryptogea in de hydrocultuur van sla en witloof*. <https://inagro.be/projecten/alternatieve-beheersing-van-phytophthora-cryptogea-de-hydrocultuur-van-sla-en-witloof>
- Vincente, A. R., Manganaris, G. A., Ortiz, C. M., Sozzi, G. O., & Crisosto, C. H. (2014). Nutritional Quality of Fruits and Vegetables. In *Postharvest handling* (pp. 69–122). Elsevier Inc. [www.dietaryguidelines.gov](http://www.dietaryguidelines.gov)
- VLAM. (2023). *Oppervlakte besteed aan de teelt van groenten in België (in HA)*. <https://www.vlaanderen.be/vlam/sites/default/files/publications/2023-08/Groenteareaal%202013-2022.pdf>
- Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., & Elias, L. G. (1989). *Basic sensory methods for food evaluation*. IDRC.
- Waycott, W., Placencia, S., Robinson, B., Vasquez, S., & Kimmell, S. (1995). Photoperiodic Response of Genetically Diverse Lettuce Accessions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(3), 460–467.
- Wellburn, A. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, 144, 307–313.
- Wheeler, G. L., Jones, M. A., & Smirnoff, N. (1998). The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants. *Nature*, 393, 365–369.
- Whickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Wickham, H., & Vaughan, D. (2024). *tidyr: Tidy Messy Data*. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>
- Williamson, G. (2017). The role of polyphenols in modern nutrition. *Nutrition Bulletin*, 42(3), 226–235. <https://doi.org/10.1111/nbu.12278>
- Woltering, E. J., & Paillart, M. J. M. (2024). Effect of low oxygen modified- and controlled-atmospheres on quality attributes and microbial population dynamics in fresh-cut iceberg lettuce. *Acta Horticulturae*, 1386, 169–173. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1386.23>
- Xiao, Z., Luo, Y., Lester, G. E., Kou, L., Yang, T., & Wang, Q. (2014). Postharvest quality and shelf life of radish microgreens as impacted by storage temperature, packaging film, and chlorine wash treatment. *LWT*, 55(2), 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.09.009>

- Yan, Z., Wang, C., Li, Z., Li, X., Cheng, F., Lin, D., & Yang, Y. (2023). Supplementary White, UV-A, and Far-Red Radiation Differentially Regulates Growth and Nutritional Qualities of Greenhouse Lettuce. *Plants*, *12*(18). <https://doi.org/10.3390/plants12183234>
- Yoruk, R., & Marshall, M. R. (2003). Physicochemical properties and function of plant polyphenol oxidase: A review. *Journal of Food Biochemistry*, *27*(5), 361–422. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2003.tb00289.x>
- Yu, H., Sun, M., Liu, M., Xiong, M., Liu, L., Wang, T., Guo, Y., Xie, Y., & Yao, W. (2023). Postharvest shelf life simulation for lettuce (*Lactuca sativa* L.) based on coupling dynamic models of respiration, gas exchange, and *Pseudomonas fluorescens* growth. *Food Packaging and Shelf Life*, *35*. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.101021>
- Zahra, N., Hafeez, M. B., Shaukat, K., Wahid, A., Hussain, S., Naseer, R., Raza, A., Iqbal, S., & Farooq, M. (2021). Hypoxia and Anoxia Stress: Plant responses and tolerance mechanisms. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *207*(2), 249–284. <https://doi.org/10.1111/jac.12471>
- Zapata, S., & Dufour, J. P. (1992). Ascorbic, dehydroascorbic and isoascorbic acid simultaneous determinations by reverse phase ion interaction HPLC. *Journal of Food Science*, *57*(2), 506–511.
- Zhang, M., Whitman, C. M., & Runkle, E. S. (2019). Manipulating growth, color, and taste attributes of fresh cut lettuce by greenhouse supplemental lighting. *Scientia Horticulturae*, *252*, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.051>
- Zhen, S., & van Iersel, M. W. (2017). Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *Journal of Plant Physiology*, *209*, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>
- Zou, J., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Woltering, E. J., Cheng, R., & Li, T. (2023). Far-red radiation during indoor cultivation reduces lettuce nutraceutical quality and shortens the shelf-life when stored at supra optimal temperatures. *Postharvest Biology and Technology*, *198*. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112269>
- Zou, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Bian, Z., Fanourakis, D., Yang, Q., & Li, T. (2019). Morphological and physiological properties of indoor cultivated lettuce in response to additional far-red light. *Scientia Horticulturae*, *257*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108725>