

Komkommer jaarrond in balans met minimaal energieverbruik II

In het kader van het programma Kas Als Energiebron



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Auteurs:

Frank Huijs (frank.huijs@botany.nl)

Maarten Vliex (maarten.vliex@botany.nl)

Conny Vervoort (conny.vervoort@botany.nl)

Martijn Wiekens (martijn@plantlighting.nl)

Govert Trouwborst (govert@plantlighting.nl)

Horst-Meterik

Oktober 2022 - April 2023

1/10/2024



mertens



Signify



Inhoudsopgave

Inhoudsopgave.....	3
1. Inleiding	6
2. Materialen en Methodes.....	8
2.1 Locatie en kasinrichting	8
2.1 Teeltgegevens	8
2.2 Metingen.....	10
3. Resultaten en discussie	11
3.1 Opbrengst.....	11
3.2 Plantmetingen.....	16
3.3 Vereenvoudigde saldoberekening.....	21
3.4 Assimilatenbalans.....	22
4. Energie	30
4.1 Warmteverbruik via buiswarmte.....	31
4.2 Elektriciteitsverbruik van de lampen.....	32
4.3 Air & Energy-systeem	34
4.4 Verdamping	38
4.5 Inzet schermen	40
4.6 Energiebalans kas	42
4.7 Teelt in kengetallen en energiekosten per kilogram komkommer.....	45
5. Leerpunten en conclusies	47
5.1 Puntsgewijze conclusies:	48
Referenties.....	49
Bijlage I: Plattegrond	50
Bijlage II: Lichtspectrum en lichtverdeling.....	51
Bijlage III: Wekelijkse plantmetingen	52
Bijlage IV: Foto's houdbaarheid.....	54
Bijlage V: Controle van de gebruikte bladoppervlakteformule.....	58
Bijlage VI: Correctie van energieverlies kasdek.....	59
Bijlage VII: Aanzet vochtbalans plant	62
Bijlage VIII: Plantsapanalyses en wateranalyses.....	63

Samenvatting

Inleiding

Van oktober 2023 tot maart 2024 heeft bij Botany te Horst-Meterik een belichte winterteelt komkommer plaatsgevonden. Het doel van deze teelt was om de energie-input per kg komkommer verder te reduceren, op basis van de bevindingen die gedaan zijn tijdens de winterteelt van 2022 – 2023.

Bij de teelt van 2022 - 2023 hebben berekeningen aan de assimilatenbalans aangetoond dat een andere balans in de energie-input – meer kWh's voor belichting en minder kuubs gas voor warmte – de ecologische voetafdruk van een kg komkommer verder kan verlagen. Dit vanwege het feit dat een gezond gewas een bepaalde basisbehoefte heeft aan licht (ongeveer 5 mol/m²/dag). Belichten boven deze basisbehoefte levert pas komkommers op. Daardoor stijgt het rendement van de lichtbenutting bij hogere lichtsommen. Dit kost niet meer energie per m², maar vraagt een andere verdeling van energie tussen licht en warmte. Uiteindelijk wordt licht namelijk ook grotendeels warmte. Tijdens deze teelt is gestreefd naar een elektraverbruik van 140 kWh/m² voor belichting (14 m³/m² aardgasequivalenten voor elektriciteit) en 6 m³/m² gas voor (buis)warmte, ten opzichte van 100 kWh/m² (10 m³/m² aardgasequivalenten voor elektriciteit) en 10 m³/m² tijdens de teelt van 2022 – 2023. In beide jaren draaide het dus om een in totaal gelijke energie-input: 20 m³/m² aardgasequivalenten.

Het aanbrengen van veranderingen in de verdeling van de energie-input, heeft consequenties voor de verdamping. Intensief schermen is een belangrijke reden waarom tijdens de teelt van 2022 - 2023 de lage warmte-input is gerealiseerd. Door de goede isolatie van de kas, is verdamping de grootste verliespost op de energiebalans van de kas. Door de verdamping nauwlettend te monitoren, kan deze zo nodig beperkt worden om het energieverbruik verder te minimaliseren. Hierbij is gestreefd naar een relatieve verdamping van minder dan 100 ml/mol PAR. Wanneer de verdamping hoger ligt, (boven de 120 ml/mol PAR), draagt extra belichting namelijk niet meer positief bij aan het opwarmen van de kas omdat de extra belichtingsenergie ten opzichte van de teelt van 2022 - 2023 volledig in verdamping wordt omgezet.

Samengevat zijn voor een energiebesparende teelt de volgende drie stappen gevolgd:

- Energiebesparing door kasisolatie
- Actieve ontvochtiging met warmte-terugwinning
- Verlaging van de hoeveelheid verdamping in gram/mol PAR

Materiaal en methoden

De proef is uitgevoerd met de volgende specificaties:

- Proefduur: week 42/2023 tot en met week 13/2024 = 24 weken
- Kascompartiment van 260 m²
- Drie rassen: Dee Flexion (hoofdras) (Enza), Up Trace (Nunhems), 34-HW-322 (Rijk Zwaan)
- Twee schermen: Lichtuitstootscherm (Obscura 9950 FR W), Energiescherm (Luxous 1147 FR)
- Actief ontvochtigingssysteem: Air & Energy-systeem (Maurice Kassenbouw)
- Plantdichtheid: 2,1 planten/m²
- Belichting: max 235 µmol/m²/s PAR assimilatiebelichting en lichtsom van 16 mol/m²/dag met maximaal 18 uur belichten.
- Spectrum belichting: R76% G9% B6% FR9%. Hierbij werd bij voldoende instraling het verrode en/of het groene deel van het spectrum uitgeschakeld. Daarnaast werden de lampen gedimd bij hoge instraling.
- Kop eruit: 11 maart 2024

De prognose is vooraf bepaald op basis van 16 mol PAR per dag in de winter en een opbouw en afbouw in mol PAR/dag in de eerste en laatste 3 weken van de teelt. De gemiddelde etmaaltemperatuur tijdens de teelt lag op 21,0 °C.

Resultaten en conclusies

Er is iets meer energie ingegaan dan de doelstelling: respectievelijk 151 kWh/m^2 en $7,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gas (en afhankelijk van de gevelcorrectie nog iets lager). Door de donkere winter is er 5 kWh/m^2 meer belicht. Het is een zoektocht geweest om te komen tot een lagere relatieve verdamping (gram/mol PAR). Halverwege de teelt (week 2) is het debiet van het ontvochtigingssysteem verlaagd. Dit had een gunstige uitwerking op de verdamping in gram/mol en een besparende werking op het gasverbruik. De productie van Dee Flexion kwam uit op $48,8 \text{ kg/m}^2$. Dit is een meerproductie van 45% ten opzichte van de teelt van 2022 – 2023. De benodigde m^3 aardgasequivalenten per kg komkommer was hierbij 19% lager ten opzichte van vorige winter. Tijdens deze teelt is hiermee aangetoond dat door een andere verdeling van de beschikbare hoeveelheid energie (meer energie voor licht, minder energie voor (buis)warmte), de ecologische voetafdruk van komkommer verder verlaagd kan worden. Een belangrijke randvoorwaarde om de energiedoelstellingen te benaderen was naast de kasisolatie en actieve ontvochtiging het verminderen van de (relatieve) verdamping, waardoor de lampwarmte effectief kon bijdragen aan het opwarmen van de kas. Aangezien de verdamping het grootste deel van de teelt lager is geweest dan 100 mL/mol PAR , kan gesteld worden dat de lampen inderdaad hebben bijgedragen aan het verwarmen van de kas, waardoor met beduidend minder kuubs gas geteeld kon worden ten opzichte van de teelt van 2022 – 2023.

Teelt:

Hoewel zowel de productiecijfers als de energie-efficiëntie van deze teelt beduidend hoger lagen dan die in de vorige winter teelt, was de lichtbenuttingsefficiëntie (LBE) aan de lage kant ($18,8 \text{ gram}$ vers per mol PAR, waarbij enkel de productieweken zijn meegenomen), terwijl vooraf gerekend is met een lichtbenuttingsefficiëntie van 22 g/mol PAR . Een mogelijke verklaring voor de laag blijvende lichtbenuttingsefficiëntie is het hoge drogestofgehalte van de vruchten: gemiddeld over de gehele teelt was dit 3,4%, terwijl 2,8% dichter bij de praktijk ligt. De redenatie kan ook worden omgekeerd: om de geprognostiseerde LBE te behalen hadden er 15% meer vruchten moeten uitgroeien dan is gebeurd. De berekeningen aan de assimilatenbalans hebben laten zien dat de aanmaak van assimilaten gedurende de gehele teelt hoger lag dan het verbruik. Dit, samen met de relatief lage plantbelasting, maken dat wellicht met een hogere plantbelasting geteeld had kunnen worden. Mogelijk heeft ook dit een verlagend effect op het drogestof gehalte van de vruchten. Mocht het drogestofgehalte van de vruchten van 3,4% teruggebracht kunnen worden naar 2,8%, levert dit een meerproductie van 21% op. In dat geval zou de LBE (alleen oogstweken) stijgen naar 23 ($18,9 \times 1,21$) wat voor winterproductie meer gangbaar is.

1. Inleiding

De glastuinbouw wil naar een fossielvrije toekomst in 2040. Door nieuwe plannen van de overheid wordt er een heffing per gebruikte kuub gas ingevoerd. Daarom is het voor de sector als geheel van groot belang om een totale besparing op fossiele brandstoffen te realiseren. Om dit doel te bereiken, en daarnaast een rendabele glastuinbouw te behouden, zullen individuele teeltbedrijven moeten investeren in energiezuinige systemen. Vanuit deze gedachte is het ook cruciaal om energiebesparing per kilogram product te realiseren.

In de winter van 2022 – 2023 heeft bij Botany het onderzoek 'Komkommer jaarrond in balans met minimaal energieverbruik' plaatsgevonden. Hierbij was het doel om met $10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gas en $100 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ($10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aardgasequivalenten) stroom kwalitatief goede komkommers te produceren. De vooraf gestelde energiedoelstellingen zijn tijdens deze teelt behaald. In het huidige onderzoek is voortgeborduurd op de bevindingen van de teelt in 2022 – 2023, waarbij gestreefd wordt naar een forse energiebesparing ten opzichte van de praktijk ($> 50\%$ energiereductie).

Berekeningen aan de assimilatenbalans toonden aan dat een andere balans in de energie-input – meer kWh's voor belichting en minder kuubs gas voor warmte – de ecologische voetafdruk van een kg komkommer verder kan verlagen. Dit vanwege het feit dat een gezond gewas een bepaalde basisbehoefte heeft aan licht (ongeveer $5 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{dag}$). Belichten boven deze basisbehoefte levert pas komkommers op. Daardoor stijgt het rendement van de lichtbenutting bij hogere lichtsommen. Dit kost niet meer energie per m^2 , maar vraagt een andere verdeling van energie tussen licht en warmte. Uiteindelijk wordt licht namelijk ook grotendeels warmte. Tijdens deze teelt wordt dan ook gestreefd naar een elektraverbruik van $140 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ($14 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aardgasequivalenten) en verwarmen met $6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gas.

Het aanbrengen van veranderingen in de verdeling van de energie-input, heeft consequenties voor de verdamping. Intensief schermen is een belangrijke reden waarom tijdens de teelt van 2022- 2023 de lage warmte-input is gerealiseerd. Door de goede isolatie van de kas, is verdamping de grootste verliespost op de warmtebalans. Door de verdamping nauwlettend te monitoren, kan deze beperkt worden om het energieverbruik verder te minimaliseren. Hierbij is gestreefd naar een verdamping van minder dan $100 \text{ mL}/\text{mol}$ PAR. Wanneer de verdamping hoger ligt, (op ongeveer $120 \text{ mL}/\text{mol}$ PAR, bij een lampefficiëntie van $3,4 \text{ } \mu\text{mol}/\text{J}$), draagt extra belichting namelijk niet meer positief bij aan het opwarmen van de kas omdat de extra belichtingsenergie volledig in verdamping wordt omgezet. In tabel 1 staat via een indicatieve berekening weergegeven wat de effecten zijn van de mate van verdamping op de warmte-input via de buis voor een winterweek.

Aangezien komkommer een hoog-verdampend gewas is, is actieve ontvochtiging met warmteterugwinning een randvoorwaarde om de doelstellingen te kunnen realiseren. Dit biedt ook de mogelijkheid om via het aanpassen van de VD setpoint en het debiet de verdamping te sturen.

De combinatie van een hoge mate van isolatie, een gunstigere verhouding van energie-input via de LED-belichting en buiswarmte, terugwinning van verdampingswarmte en controle over de verdamping moeten een rendabelere en energiezuinigere komkommerteelt binnen handbereik brengen.

Tabel 1: Het effect van de mate van de verdamping op de benodigde warmte-input via de buis voor een winterweek.

	'22 – '23	'23 – '24
PAR (mol/dag)	12	16
Verdamping per mol PAR (mL/mol)	120	100
Verdamping per dag (L/m ²)	1,4	1,6
Theoretisch mogelijke verdamping (afhankelijk van lampefficiëntie)	125 *	120 *
Besparing/week (m ³ /m ² gaseq.)	0,04	0,2
Benodigde warmte-input (m ³ /m ² gaseq.)	0,5	0,5
Warmte via buis (m ³ /m ²)	0,5 – 0,04 = 0,5	0,5 – 0,2 = 0,3

* De theoretische verdamping is afhankelijk van de lampefficiëntie. Deze efficiëntie was in '22 – '23 $3,3 \text{ } \mu\text{mol}/\text{J}$, in '23 – '24 was de lampefficiëntie $3,4 \text{ } \mu\text{mol}/\text{J}$

Samengevat zijn voor een energiebesparende teelt de volgende drie stappen gevolgd:

- Energiebesparing door kasisolatie
- Actieve ontvochtiging met warmte-terugwinning
- Verlaging van de hoeveelheid verdamping in gram/mol PAR

Doelstellingen:

Het ontwikkelen en verder optimaliseren van een energiezuinige teeltstrategie voor de belichte hogedraad komkommerteelt, waarmee een energiereductie van > 50% ten opzichte van de praktijk wordt nagestreefd. Hierbij wordt rekening gehouden met twee factoren:

1. Verlaging van de ecologische voetafdruk van een kilogram komkommer door een efficiënte verhouding elektra en warmte. Hierbij wordt gestreefd naar belichten met $\sim 14 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aardgasequivalenten en verwarmen met $\sim 6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ aardgasequivalenten.
2. Optimalisatie van de verdamping van een komkommerplant in samenhang met minimaal energieverlies.

2. Materialen en Methodes

2.1 Locatie en kasinrichting

Het onderzoek is uitgevoerd op de locatie van Botany BV in Horst-Meterik. De teelt heeft plaatsgevonden in een nieuwe Venlo-kas afdeling van 260 m² die beschikte over 9 teeltgoten. De volledige indeling van de kas is schematisch uitgewerkt in bijlage I. De komkommerplanten zijn opgekweekt bij een externe kweker en geplant op 16 oktober 2023. De teelt is beëindigd op 1 april 2024. Er zijn drie verschillende rassen geplant, Dee Flexion was het hoofd- en stuurras en werd op de 3 middelste goten uitgeplant. Up Trace werd geplant op goot 2 en goot 7 en het ras 34-HW-322 werd op de goten 3 en 8 geplant. Randrijen (goot 1 en 9) zijn uitgesloten van de metingen en proefresultaten. In tabel 2 staan de details van de teelt verder uitgeschreven.

Tabel 2: Kasinrichting

Gegevens	Beschrijving
Ras:	Dee Flexion (Enza); Up Trace (BASF Vegetable Seeds); Proefras 34-HW-322 (Rijk Zwaan)
Plantdatum:	16 oktober 2023 (week 42)
Einddatum	1 april 2024
Teeltduur:	24 weken + 1 dag
Teeltoppervlakte:	260 m ² (breedte 14,4 m, lengte 18,4 m)
Plantafstand:	35 cm
Gootafstand:	1,7 m
Plantdichtheid:	2,1 pl/m ²
Matten:	Grodan master FT 1,20
Irrigatie:	Druppel irrigatie (Afgifte 1,2 L/uur)
Schermen:	Lichtuitstootscherm (Obscura 9950 FR W), Energiescherm (Luxous 1147 FR)
Actieve ontvochtiging:	Lucht-lucht warmtewisselaar (90%) (Air&Energy, Maurice Kassenbouw)
Lichtintensiteit	235 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ (Dee Flexion), bij 18 uur 15,2 $\text{mol/m}^2/\text{dag}$
Spectrum	76%R / 9%G / 6%B / 9%FR (Signify, met mogelijkheid tot (spectraal) dimmen)
Proefkoers	DLI van 16 mol/m^2 PAR
CO ₂	700 ppm

2.1 Teeltgegevens

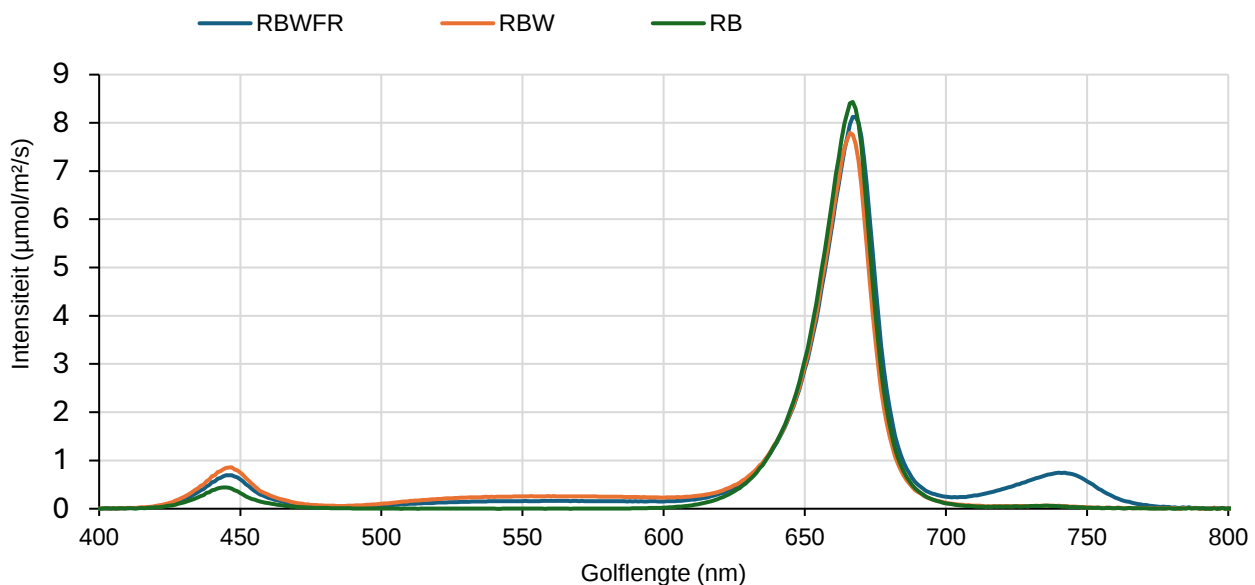
Tijdens deze teelt is bespaard op zowel gasverbruik als elektraverbruik. Temperatuur, licht en sturing op verdamping waren de belangrijkste factoren waarmee dit gerealiseerd kon worden.

2.1.1 Temperatuur

Tijdens de gehele proefperiode was de gemiddelde etmaaltemperatuur 21,0 °C. Om de warmte zoveel mogelijk vast te houden werd gebruik gemaakt van schermen (energiescherm en verduisteringsscherm). Ook werd gebruik gemaakt van een Air & Energy-systeem waardoor er actief ontvochtigd kon worden en waarbij warmte teruggewonnen kon worden door de gecontroleerde uitwisseling tussen de warme, vochtige kaslucht en de droge, koude buitenlucht via warmtewisselaars. Hierbij wordt de latente warmte van de kaslucht omgezet in voelbare warmte van de inkomende lucht met een—volgens opgaven van de fabrikant—efficiëntie van meer dan 90% voor de voelbare warmte.

2.1.2 Belichting

De kas was uitgerust met full-LED (dimbaar en spectraal stuurbaar), met het spectrum 76%R, 9%G, 6%B, 9%FR type lampen van Signify (Figuur 1). Tijdens de proef werd een maximale lichtintensiteit van $235 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gerealiseerd in de rijen met het hoofdtras Dee Flexion. Bij 18 uur belichten geeft dit een PAR-som van $15,2 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{dag}$. Er is in eerste instantie een koers uitgezet voor $16 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{dag}$. In de tweede helft van de teelt zijn hogere lichtsommen per dag behaald. Om verder te besparen werd gedimd op tijden dat er voldoende instraling was (uitgaande van $16 \text{ mol}/\text{m}^2$ PAR per dag). Tot slot werd de energie-efficiëntie van de lampen verhoogd door het verrode en groene deel van het spectrum uit te zetten op momenten dat er voldoende instraling was. Plant Lighting heeft de lichtverdeling in de kas gemeten. Deze was niet optimaal, waardoor niet ieder ras dezelfde hoeveelheid licht heeft ontvangen. In Bijlage II is een figuur opgenomen waarin de lichtverdeling van de kas is weergegeven.



Figuur 1: De toegepaste spectra tijdens deze teelt. RBWFR: volledige spectrum aan; RBW: Verrood uitgeschakeld; RB: Wit en Verrood uitgeschakeld.

2.1.3 Watergift

Tijdens dit onderzoek werd de watergift afgestemd op de gegevens die werden verkregen met de GroSens. Hiermee werd het vochtgehalte, de EC en de temperatuur in de matten gemeten. Daarnaast werden wekelijks gift-, drain- en plantsapanalyses uitgevoerd. Opvallend gedurende deze teelt was de lage EC die werd teruggevonden in de drain (van week 48 tot en met week 5 lag de gemiddelde drain EC op 2,0. Het gemiddelde over de gehele teelt lag op 2,7), ondanks de hoge EC in de gift (gemiddeld 3,4 over de gehele teelt). In bijlage VIII staat een overzicht van de resultaten van de uitgevoerde analyses.

2.2 Metingen

Er werden metingen uitgevoerd door zowel Botany en Plant Lighting. Hierbij hield Botany zich met name bezig met de plantmetingen en de opbrengst bepaling. Deze plantmetingen werden wekelijks uitgevoerd om de plantontwikkeling in de gaten te houden. Op basis van deze gegevens, in combinatie met de beschikbare hoeveelheid licht, werd ook bepaald wat de teeltstrategie zou worden (vruchtdunning en bladplukken). Om de rassen zo eerlijk mogelijk met elkaar te kunnen vergelijken, werden de LAI, vruchtzetting en plantbelasting zoveel mogelijk gelijk gehouden en per ras bepaald. Naast de plantmetingen werd ook de opbrengst bepaald. Hierbij werd het aantal stuks geteld het gewicht gewogen. Tot slot werd ook de houdbaarheid van de vruchten van de verschillende rassen onderzocht. Hierbij werd de kwaliteit van de vruchten bepaald na 1, 5, 7, 10 en 14 dagen. Parameters waar gebruik van werd gemaakt waren onder andere stevigheid, uniformiteit, vorm, kleur, slijtage en schilbeschadigingen. Deze resultaten werden vergeleken met de teelten uit Spanje en met de teelten uit de praktijk in Nederland. In Tabel 3 staat nog een keer toegelicht welke plantmetingen werden uitgevoerd door Botany en hoe vaak. De metingen die Plant Lighting heeft uitgevoerd waren nodig om de energetische- en verdampingsvraagstukken te beantwoorden en de assimilatenverdeling van het gewas in kaart te brengen. Hoe deze metingen en berekeningen werden uitgevoerd, wordt verder toegelicht in de desbetreffende hoofdstukken.

Tabel 3: Metingen

Meting	Aantal planten	Frequentie
LAI	2 planten per ras	2x per week
Lengtegroei	Dee Flexion: 15; Up Trace: 10; 34-HW-322: 10	1x per week
Bladafsplitsing	Dee Flexion: 15; Up Trace: 10; 34-HW-322: 10	1x per week
Vruchtzetting	Dee Flexion: 20; Up Trace: 10; 34-HW-322: 10	1x per week
# oksels van bloei tot kop	Dee Flexion: 20; Up Trace: 10; 34-HW-322: 10	1x per week
Plantbelasting	Dee Flexion: 20; Up Trace: 10; 34-HW-322: 10	1x per week
Bladoppervlak	Dee Flexion: 20; Up Trace: 10; 34-HW-322: 10	1x per week
Opbrengst	52 planten per goot	3x per week
Vruchtgewicht	52 planten per goot	3x per week
Lichtbenuttingsefficiëntie	52 planten per goot	1x per week
Houdbaarheid	12 vruchten	4 momenten in de teelt

3. Resultaten en discussie

3.1 Opbrengst

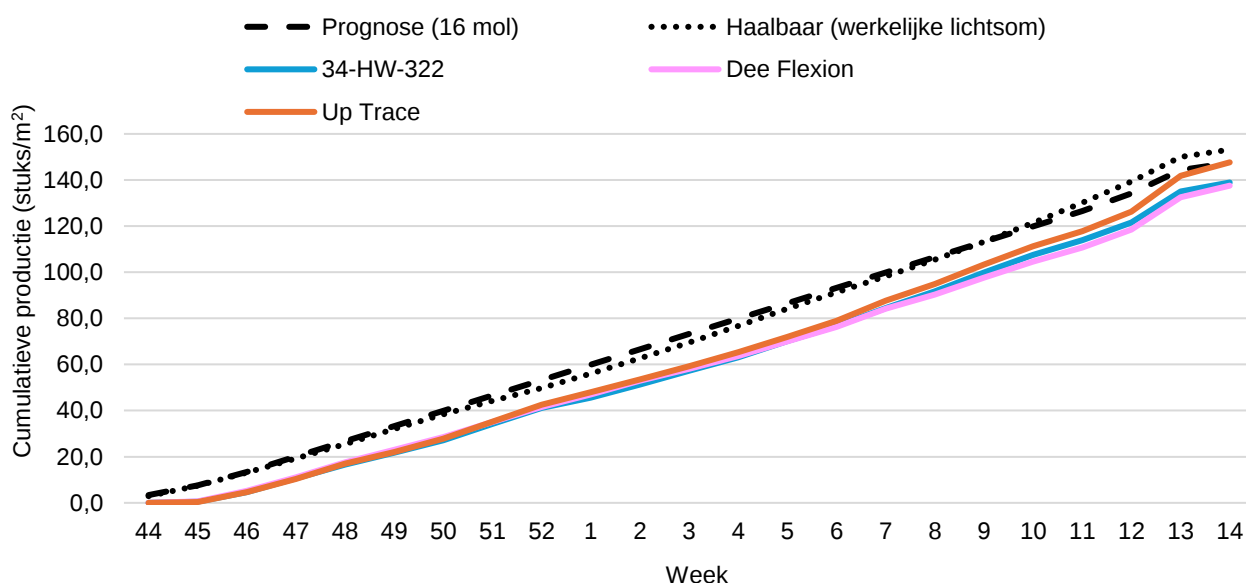
Op basis van de verwachte lichtbeschikbaarheid werd een potentiële productie berekend. Hierbij werd gerekend met een lichtbenuttingsefficiëntie van 22 g/mol, waarbij de productie van de betreffende week werd gedeeld door de gemiddelde lichtsom van de twee weken ervoor.

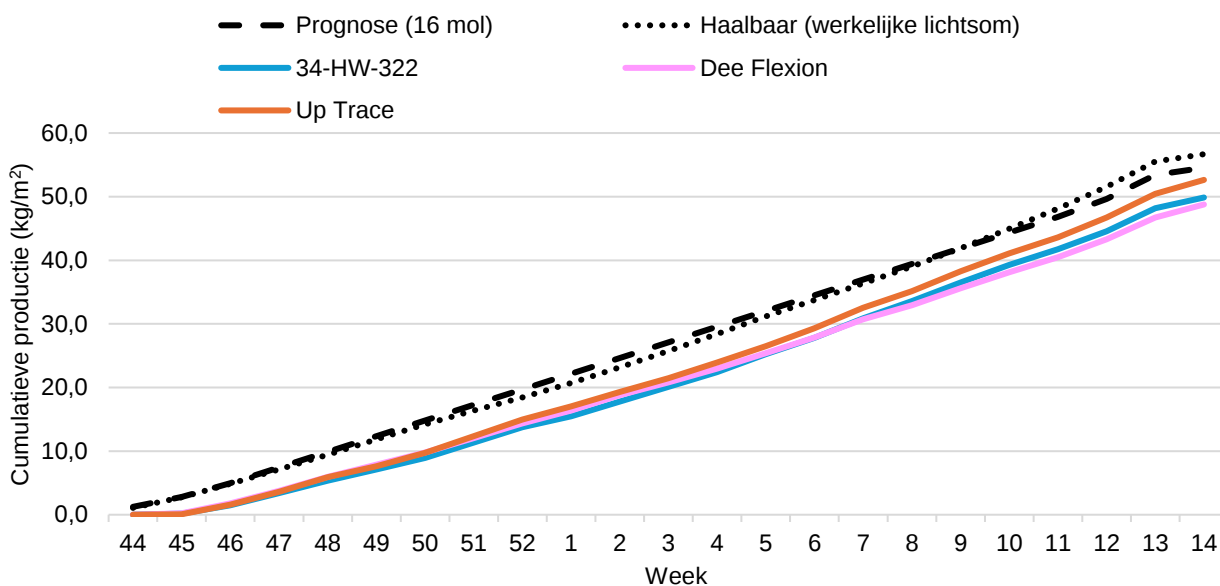
Gedurende de teelt werden de opbrengsten van de rassen vergeleken met de opgestelde prognose (zwarte gestreepte lijn in de figuren). Aangezien de werkelijk gerealiseerde lichtsommen afwijken van de prognose (waarbij de werkelijke lichtsom hoger ligt dan de geprognostiseerde lichtsom) is ook de haalbare productie op basis van de werkelijke lichtsom in de figuren opgenomen (zwarte stippellijn).

In figuur 2 is de cumulatieve productie in aantallen en kilogrammen weergegeven, in figuur 3 de producties per week. De cumulatieve productie laat zien dat gedurende het grootste deel van de teelt de prognose niet gehaald werd. Hierbij wordt een grotere achterstand waargenomen ten opzichte van de theoretisch haalbare productie in het cumulatieve gewicht (14% lager dan haalbaar voor Dee Flexion) ten opzichte van de aantallen (10% lager dan haalbaar voor Dee Flexion). De oorzaak hiervoor is dat het gerealiseerde vruchtgewicht lager lag dan vooraf beoogt (gemiddeld 360 gram in plaats van 370 gram).

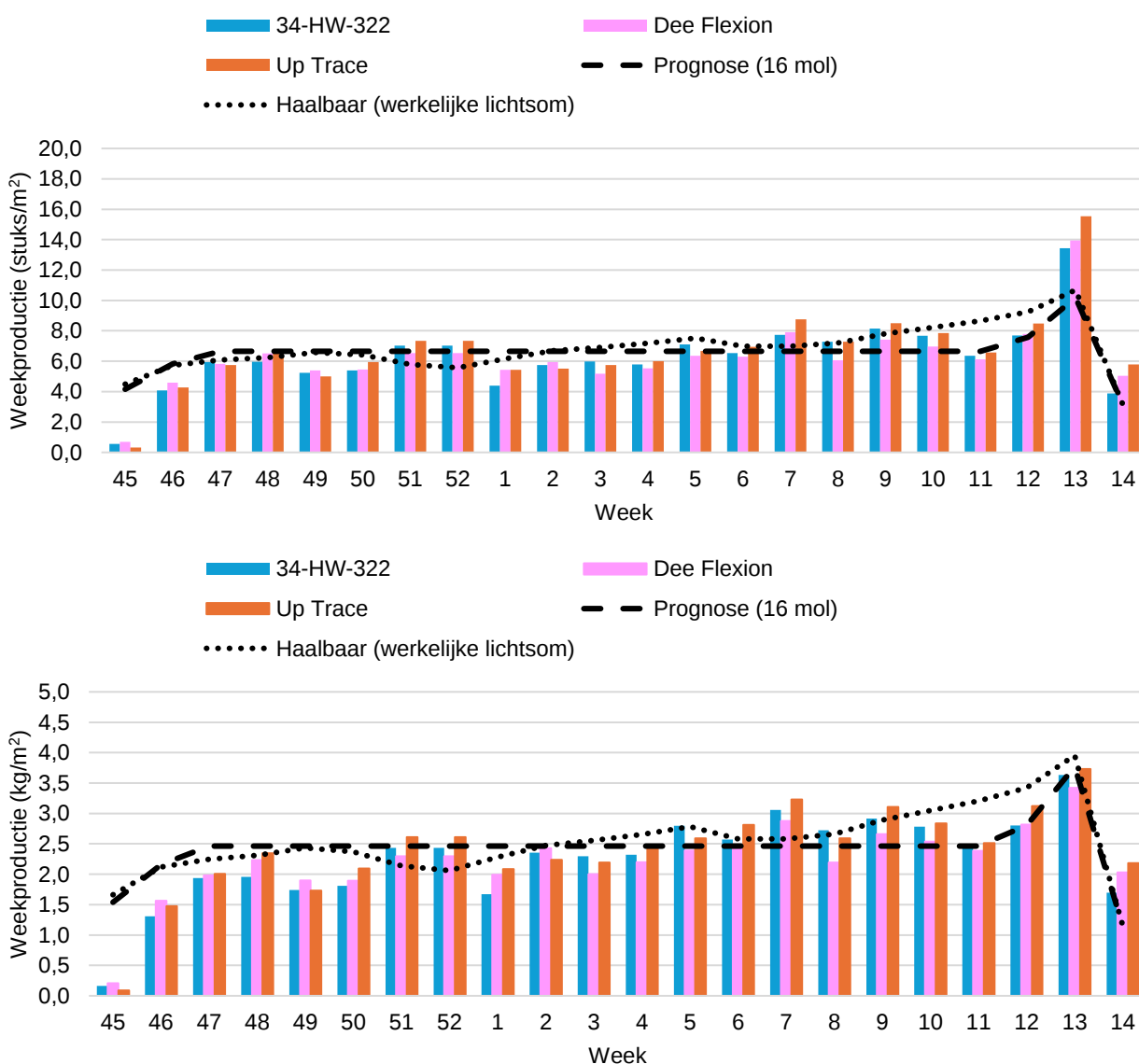
Uit figuur 3 blijkt dat met name in het begin van de teelt (tot en met week 51) en in week 1 tot en met week 4 de producties niet gerealiseerd worden. In de overige teeltweken werd de geprognostiseerde productie wel dicht benaderd of gerealiseerd. De achterblijvende productie in het begin van de teelt is mogelijk te verklaren door de lage bladafsplitsing, waardoor niet voldoende vruchten zijn aangelegd. Deze lage bladafsplitsing is het gevolg van de lage etmaaltemperaturen. Ook de aanwezigheid van trips heeft mogelijk bijgedragen aan de lagere productie, wat met name halverwege de teelt zorgde voor misvormde vruchten (figuur 4).

Tijdens de teelt werden wat productieverschillen waargenomen tussen de rassen. Echter, de lichtverdeling in de kas was niet optimaal waardoor het ene ras meer licht heeft ontvangen dan het andere (bijlage II). Dit maakt het lastig om een goede vergelijking in opbrengst te maken tussen de rassen. De lichtmeting die Plant Lighting heeft uitgevoerd, heeft uitgewezen dat de gemiddelde intensiteit assimilatielicht voor Dee Flexion lag op 234,5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (100%), voor 34-HW-322 was dit 261,2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (111%) en voor Up Trace lag dit op 272,1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (116%). Bij een gelijke lichtsom natuurlijk licht was dit respectievelijk ruim 7% en een kleine 11% hogere PAR-som. Als deze gegevens vergeleken worden met de opbrengstcijfers, wordt de laagste productie gerealiseerd bij het ras wat het minste licht heeft ontvangen en de hoogste productie bij het ras wat het meeste licht heeft ontvangen (figuur 2). Gecorrigeerd voor de lichtsom vallen de verschillen weg.





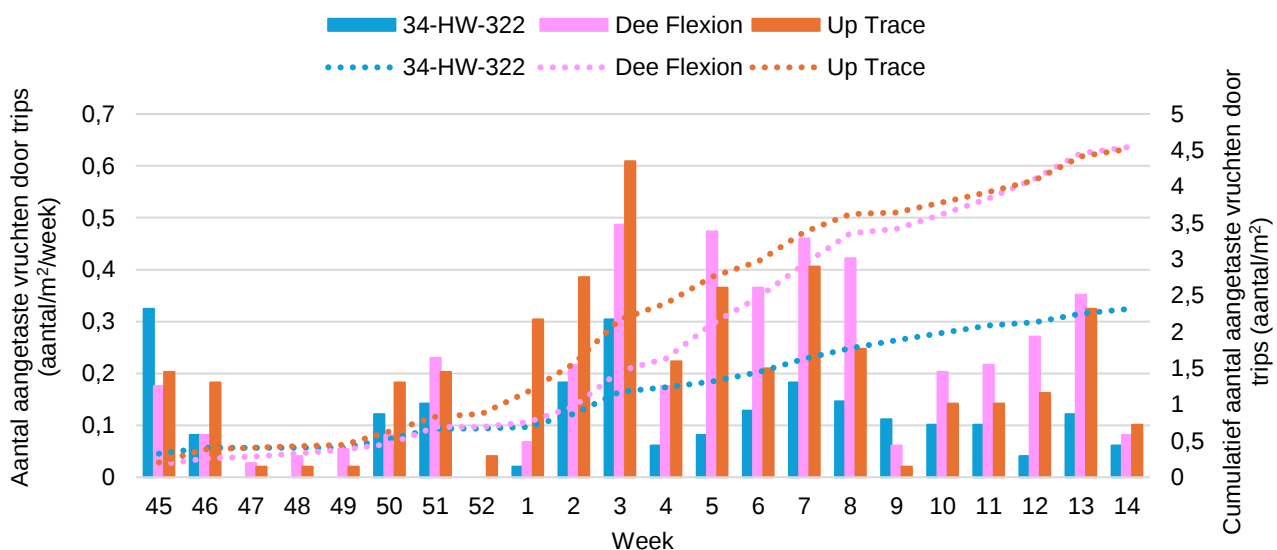
Figuur 2: Cumulatieve producties. Boven: cumulatieve productie in aantal/ m^2 . Beneden: cumulatieve productie in kg/m^2



Figuur 3: Weekproducties. Boven: weekproductie in stuks/ m^2 . Beneden: weekproductie in kg/m^2

3.1.1 Tripsschade

Zoals in de vorige paragraaf is beschreven, werd in week 1 tot en met week 4 de geprognostiseerde productie niet gerealiseerd. Een belangrijke oorzaak voor het niet halen van de producties in deze weken is de tripsschade die werd waargenomen in het gewas: als de trips de bloeiende vruchten aanprikt, resulteert dit in kromme vruchten. Hierdoor was het niet mogelijk om deze vruchten op het gestreefde vruchtgewicht te oogsten (370 g). Deze kromme vruchten zijn dan ook apart geregistreerd (geteld) en zijn niet meegewogen bij de totale productie. In figuur 4 wordt zichtbaar dat het aantal aangetaste vruchten door trips in week 1 tot en met week 8 hoog is. De cumulatieve lijnen in deze figuur laten zien dat met name Up Trace en Dee Flexion gevoelig bleek voor de tripsschade. De totale theoretische productie die verloren is gegaan als gevolg van de tripsdruk, is 0,86 kg/m² voor 34-HW-322, 1,67 kg/m² voor Up Trace en 1,68 kg/m² voor Dee Flexion.

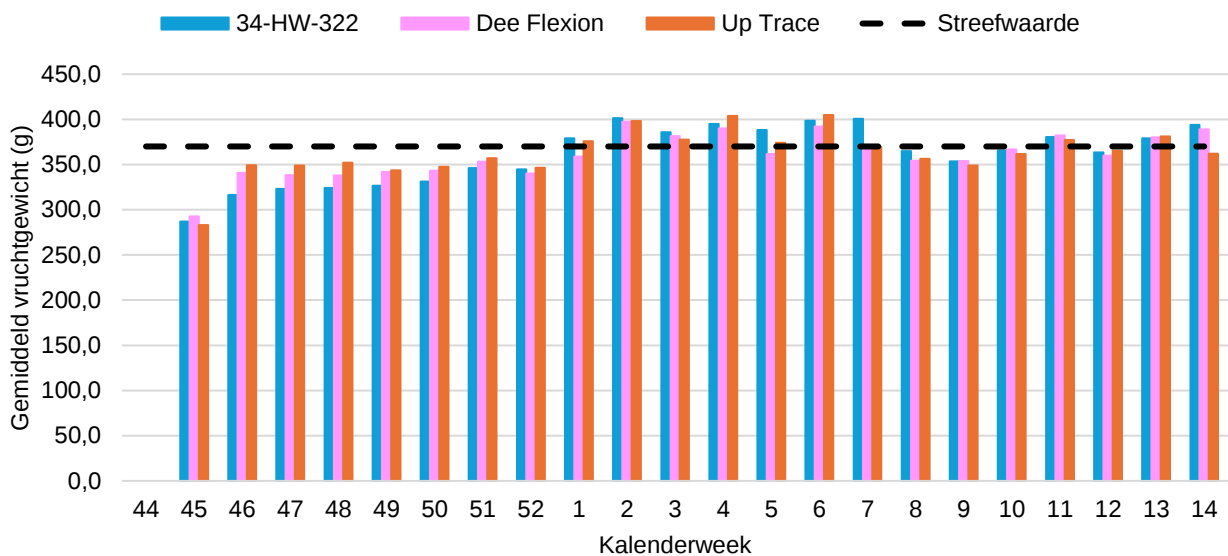


Figuur 4: Aantal vruchten, aangetast door trips.

3.1.2 Gemiddeld vruchtgewicht

Bij het opstellen van de prognose is gerekend met een vruchtgewicht van 370 gram. Zoals blijkt uit figuur 5, was dit vruchtgewicht in het begin van de teelt (tot en met week 52) niet gerealiseerd. Vanaf week 1 werd dit wel gehaald. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de etmaaltemperaturen in het begin van de teelt aan de lage kant waren. Door deze lagere etmalen, nam de uitgroeiduur van de vruchten toe waardoor de vruchten relatief licht geoogst moesten worden om het stapelen van vruchten te voorkomen. Vanaf week 1 werden de vruchtgewichten wel gerealiseerd. De etmaaltemperaturen lagen vanaf dat punt ook hoger. Door de instellingen van het Air & Energy-systeem aan te passen (verlagen van het debiet), werd het mogelijk om hogere temperaturen te realiseren, zonder de extra input van gas.

Gemiddeld over de gehele teelt ligt het vruchtgewicht rond 360 gram voor alle rassen. Dit geeft een 3% te laag vruchtgewicht ten opzichte van de prognose. Het niet behalen van de prognose komt dus primair doordat er te weinig vruchten mochten uitgroeien en niet door het lage vruchtgewicht. Van week 1 tot het eind van de teelt, lag het gemiddelde vruchtgewicht tussen de 373 en 382 gram, afhankelijk van het ras.



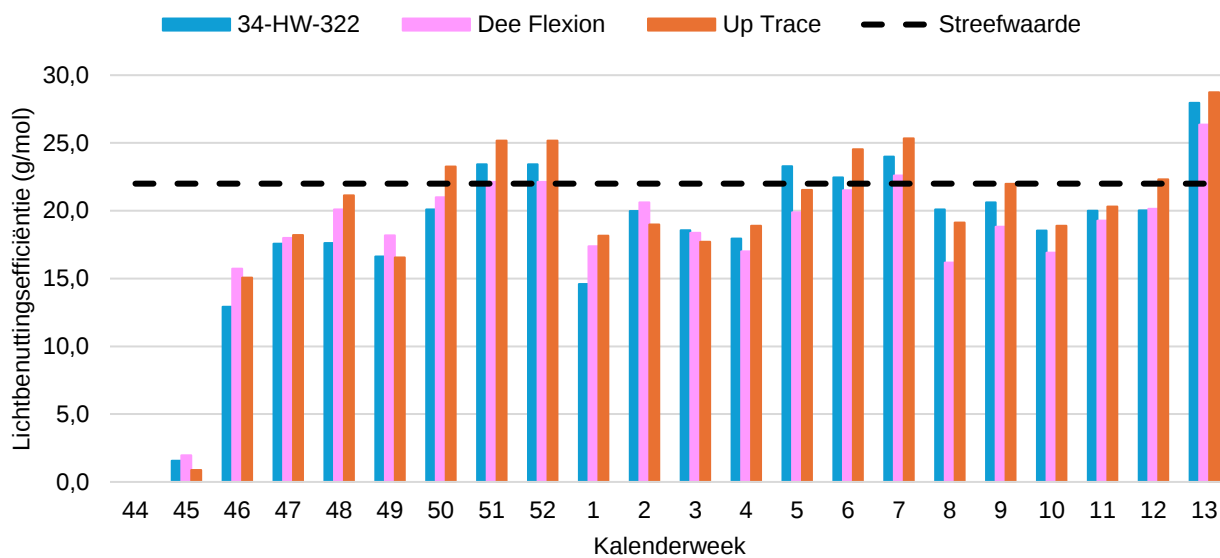
Figuur 5: Gemiddeld vruchtgewicht

3.1.3 Gemiddelde lichtbenuttingsefficiëntie

Zoals eerder genoemd, werd de productieprognose gebaseerd op een lichtbenuttingsefficiëntie van 22 gram versgewicht per mol licht gedurende de productieweken. Dit levert een LBE over de gehele teelt op die op 21gram/mol ligt¹. De lichtbenuttingsefficiëntie werd berekend door versproductie van de betreffende week te delen door de gemiddelde lichtsom van de twee weken ervoor. Figuur 6 laat zien dat deze lichtbenuttingsefficiëntie gedurende het grootste deel van de teelt niet behaald is. Gemiddeld over de gehele teelt lag de lichtbenuttingsefficiëntie van het hoofdtras Dee Flexion op 17,9 gram per mol. Een mogelijke verklaring voor het achterblijven van de lichtbenuttingsefficiëntie is het hoge drogestof percentage van de vruchten: gemiddeld over de gehele teelt lag het drogestofpercentage van Dee Flexion namelijk op 3,4%, terwijl een drogestof percentage van 2,8 dichterbij de praktijk ligt. Het hoge drogestofpercentage kan ook een gevolg zijn van het laten uitgroeien van te weinig vruchten. Bij een totale PARsom van 2711 mol/m² is er bij een totale LBE van 21 gram vers/mol PAR 56,9 kg/m² productie mogelijk. Dit zijn 153,8 vruchten/m² bij een vruchtgewicht van 370 g. Er zijn 132,5 vruchten geoogst (Figuur 2) en 4,5 vruchten/m² zijn er verloren gegaan door de trips (Figuur 4). Er mochten dus 11% (137/153,8) te weinig vruchten uitgroeien.

¹ NB in dit rapport worden twee LBE's gehanteerd:

- De LBE berekend voor de oogstweken. Deze wordt ook gebruikt voor de prognose. De prognose stond voor de winterweken op 22 gram/mol en voor het eindschot (kop eruit) ging deze naar 30 gram/mol.
- De LBE berekend als de totale productie gedeeld door de totale lichtsom. Op basis van de prognose zou deze op 21 gram/mol hebben moeten uitkomen.



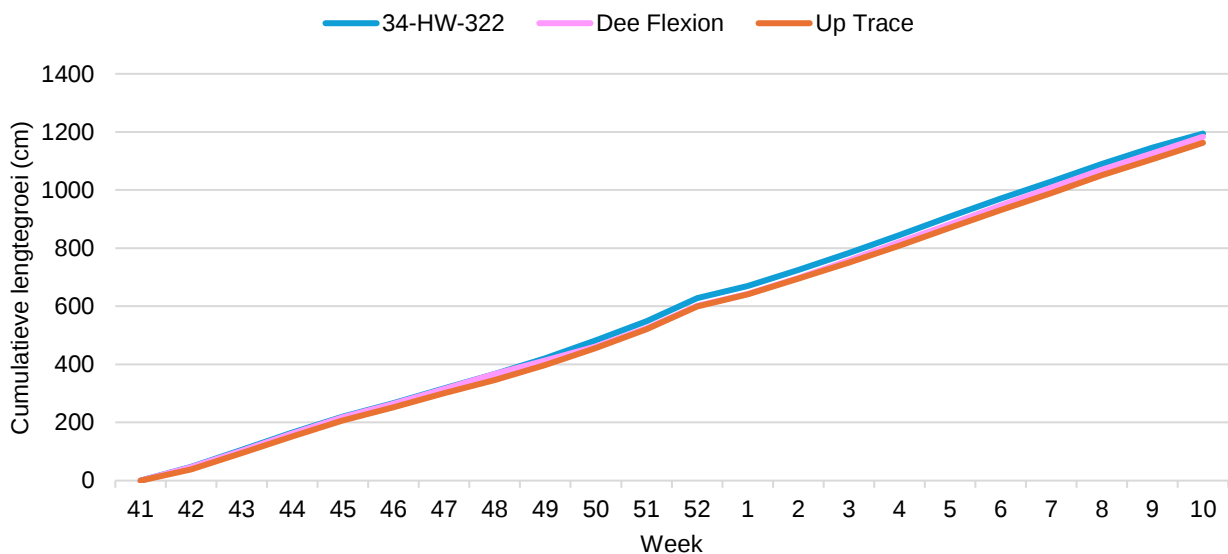
Figuur 6: Gemiddelde lichtbenuttingsefficiëntie (productie per week gedeeld door de gemiddelde lichtsom van twee weken ervoor).

3.2 Plantmetingen

Gedurende dit onderzoek zijn er een aantal plantmetingen uitgevoerd: lengtegroei, bladafplitsing, aantal gezette vruchten, plantbelasting, bloeihoogte en bladoppervlak. Deze zijn uitgevoerd tot en met week 10, aangezien in week 11 de kop uit het gewas gehaald is. De meest belangrijke resultaten staan hieronder weergegeven, de overige resultaten staan in de bijlage.

3.2.1 Lengtegroei

In figuur 7 is de cumulatieve lengtegroei van de verschillende rassen weergegeven. Gedurende de gehele teelt treden slechts minimale verschillen op in lengtegroei tussen de verschillende rassen. Hierbij bleef Up Trace het kortst met 1162,7 cm. 34-HW-322 werd het langst met 1194,4 cm. Dee Flexion zat daar tussenin met 1183,3 cm.

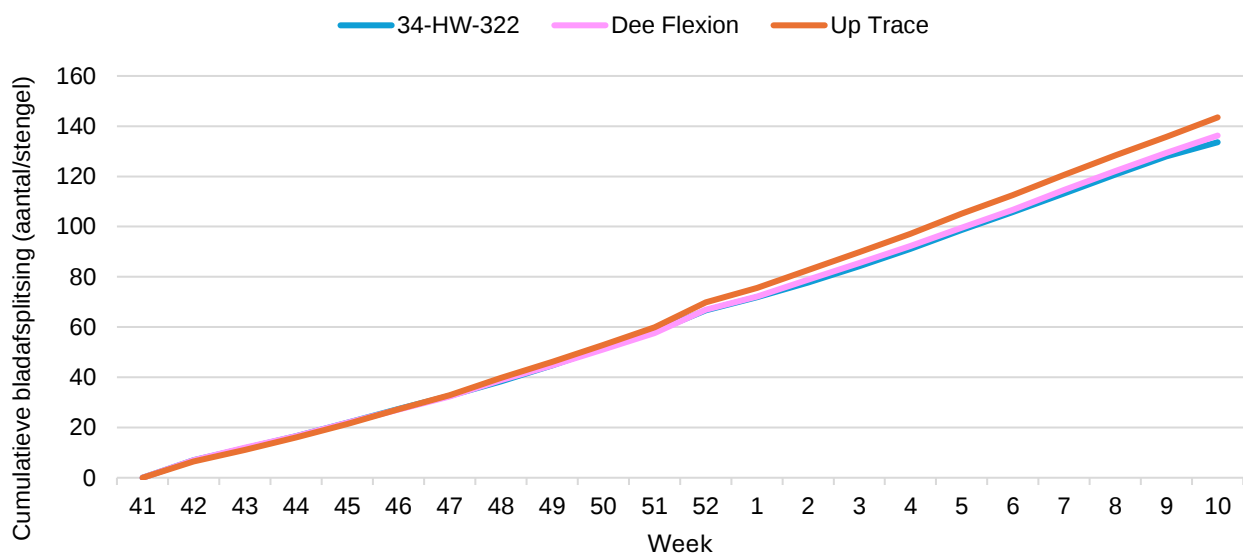


Figuur 7: Cumulatieve lengtegroei

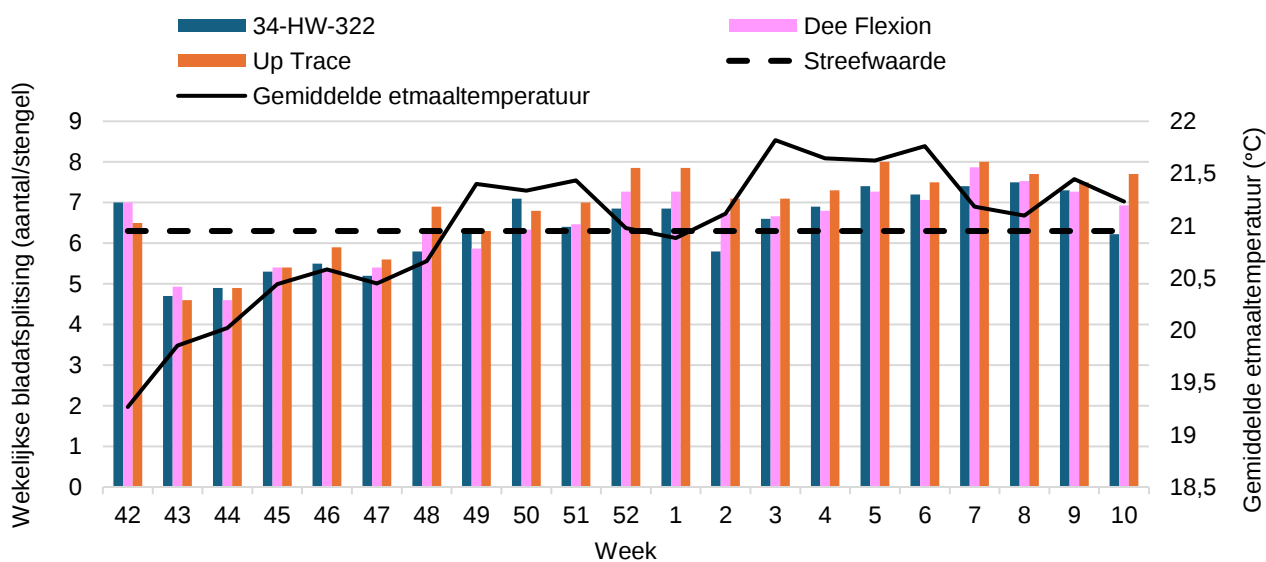
3.2.2 Bladafplitsing

Hoewel in lengtegroei nauwelijks verschillen werden waargenomen, waren er wel kleine verschillen in bladafplitsing: Up Trace had de hoogste bladafplitsing met 143,5 bladeren per stengel (figuur 8). 34-HW-322 had de laagste bladafplitsing met 133,6 bladeren per stengel. Dee Flexion zat hier tussenin met 136,3 bladeren per stengel. Opvallend is dat Up Trace het kortst is gebleven maar wel de meeste bladeren heeft afgesplitst. 34-HW-322 werd juist het langst met het minste aantal bladeren.

In figuur 9 staat de wekelijkse bladafplitsing weergegeven. De streefwaarde geeft hier het aantal bladeren aan dat afgesplitst zou moeten worden om het aantal vruchten aan te leggen dat nodig is om de productieprognose te halen bij om en om dunnen. Hierbij is te zien dat gedurende de eerste weken van de teelt de bladafplitsing beneden deze streefwaarde heeft gelegen. Hierdoor zijn niet voldoende vruchten aangelegd (zie ook figuur III.3 in bijlage III), waardoor de prognoses in deze weken ook niet behaald zijn. De verklaring voor de lagere bladafplitsing gedurende deze periode is de lagere etmaaltemperatuur (de gemiddelde etmaaltemperatuur van week 42 tot en met week 47 lag op 20,1 °C, van week 48 tot en met week 10 lag deze op 21,3 °C).



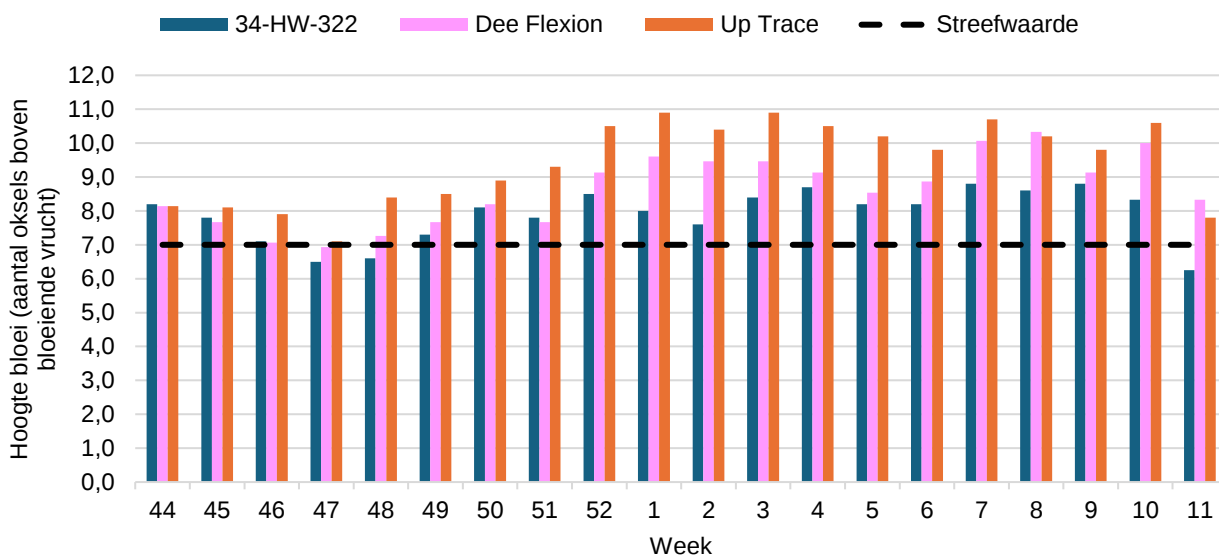
Figuur 8: Cumulatieve bladafplitsing



Figuur 9: Wekelijkse bladafplitsing

3.2.3 Bloeihoogte

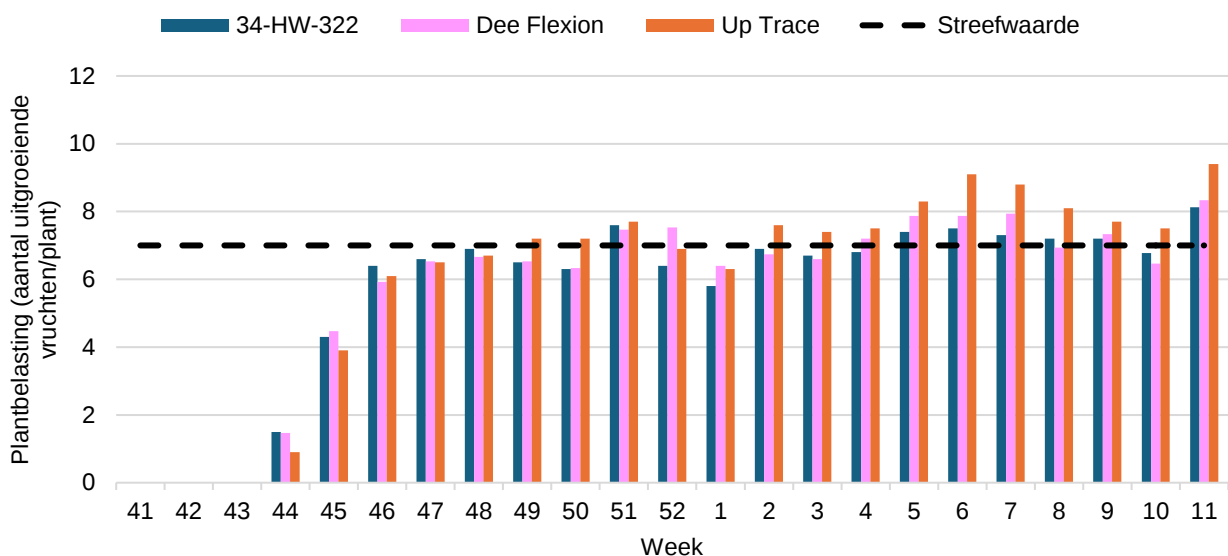
Een graadmeter om te kunnen stellen of een plant meer generatief of meer vegetatief groeit is door het tellen van het aantal oksels boven de bovenste bloeiende vrucht. In de praktijk wordt vaak gesteld dat wanneer dit aantal 7 - 8 is, de plant in balans is. Is dit getal hoger, dan groeit de plant meer vegetatief (vaak is de bladafsplitsing in die week dan ook hoog). Is dit aantal lager dan 7, groeit de plant meer generatief. De resultaten in figuur 10 laten zien dat de bloei het laagst lag bij Up Trace (gemiddeld 9,4 oksels vanaf de bloeiende vrucht). Voor Dee Flexion lag dit aantal op 8,6 en voor 34-HW-322 was dit 7,9. Met name Dee Flexion en Up Trace hebben dus (te) vegetatief gegroeid gedurende deze teelt.



Figuur 10: Bloeihoogte (aantal oksels boven de bloeiende vrucht)

3.2.4 Plantbelasting

Een tweede graadmeter om te kunnen bepalen of een plant in balans is, is de plantbelasting. Tijdens deze teelt is een streefwaarde van 7 uitgroeiende vruchten per plant aangehouden. Zoals in figuur 11 te zien is, is de plantbelasting op meerdere momenten lager geweest dan 7. In de eerste weken van de teelt hangt dit samen met de lagere bladafsplitsing (en de daarmee samenhangende lagere vruchtzetting). Later in de teelt is er wellicht wat te voorzichtig omgegaan met het dunnen van de vruchten. Gemiddeld over de gehele teelt lag de plantbelasting voor 34-HW-322 op 6,5 uitgroeiende vruchten per plant, voor Dee Flexion was dit 6,6 en Up Trace had gemiddeld 7,0 uitgroeiende vruchten per plant. De berekeningen aan de assimilatenbalans, uitgevoerd door Plant Lighting (zie paragraaf 3.3.3), laten zien dat de aanmaak van assimilaten gedurende de gehele teelt hoger is geweest dan het verbruik. Dit gegeven, samen met de relatief lage bloeihoogte en lage plantbelasting die tijdens de teelt is waargenomen, maken dat er wellicht te voorzichtig is geteeld en dat mogelijk gestreefd had mogen worden naar een hogere vruchtzetting en plantbelasting. De verwachting is dat wanneer geteeld wordt met een hogere plantbelasting, het drogestofgehalte van de vruchten zal dalen, waardoor de lichtbenuttingsefficiëntie zal toenemen.



Figuur 11: Plantbelasting, het aantal uitgroeiende vruchten per plant.

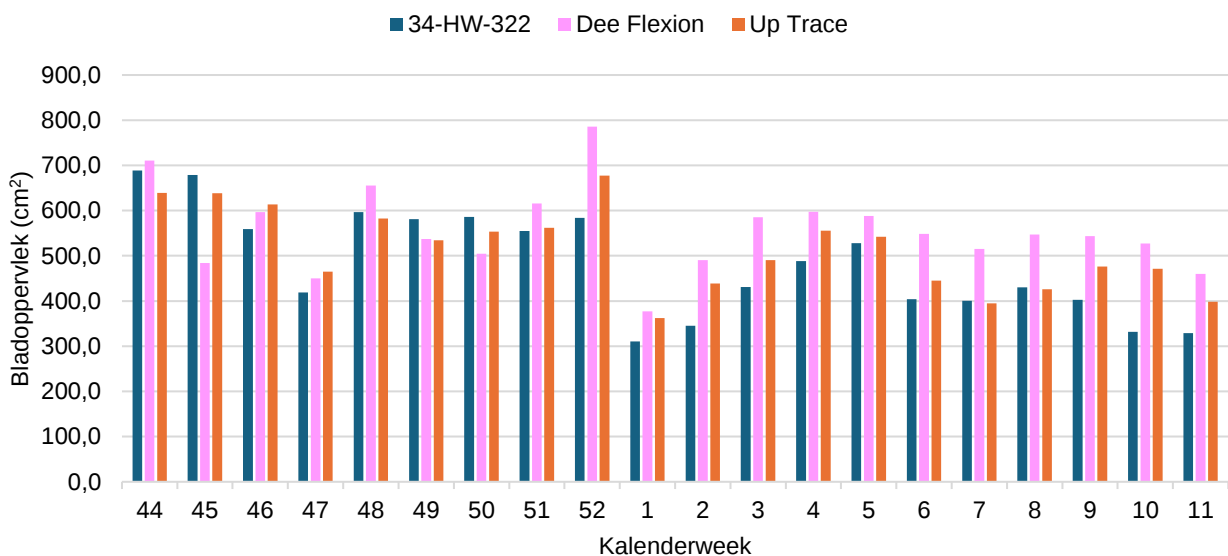
3.2.5 Bladoppervlak

Tot slot werd ook het bladoppervlak gemeten (figuur 12). Om iedere week het aantal bladeren te kunnen tellen, werd wekelijks een label gedaan om het jongste blad. Voor het meten van het bladoppervlak, werd telkens de lengte van het gelabelde blad van de week ervoor gemeten. Uit de resultaten blijkt dat het bladoppervlak van 34-HW-322 het kleinst was (gemiddeld 482,4 cm²). Dee Flexion maakte het grootste blad met 556,0 cm² en Up Trace zat hier tussenin met 513,3 cm².

Het bladoppervlak is berekend door de meting van de bladlengte en de volgende formule toe te passen:

$$\text{Bladoppervlak} = 1,1662 * \text{lengte blad} * \text{lengte blad} - 11,95703 * \text{lengte blad} + 61,41754$$

Deze formule is geijkt op Dee Viata in de zomer van 2023 en op Dee Flexion in de winter van 2023 – 2024 waaruit bleek dat deze formule een onderschatting geeft (Bijlage V).



Figuur 12: Bladoppervlak in cm² van een jong volgroeid blad.

3.2.6 Houdbaarheid

De houdbaarheid van de vruchten van de 3 rassen is in deze proeven vergeleken met elkaar, een Spaans product en een Nederlands product uit de belichte teelt (Tabel 4). Hiervoor zijn van ieder ras 12 vruchten opgestuurd voor de houdbaarheidsbeoordeling. De resultaten laten, afhankelijk van het seizoen wat fluctuaties zien. Over het algemeen kan gesteld worden dat het aantal klasse 1 vruchten van de geoogste vruchten van de 3 verschillende rassen vergelijkbaar of hoger is dan het Spaanse- en Nederlandse product. Ditzelfde geldt voor het algemene oordeel en het percentage houdbaarheid.

Tabel 4: Gemiddelde houdbaarheid in december, januari, februari en maart, op 7 en 14 dagen na oogst.

Aantal klasse 1 vruchten op 7 en 14 dagen na oogst. N = 12

Periode	Dag	34-HW-322	Dee Flexion	Up Trace	Spaans Product	Nederlands product belichte teelt
December	7	9	12	9	12	-
	14	6	9	7	7	-
Januari	7	12	12	9	12	12
	14	12	12	8	2	10
Februari	7	12	11	12	-	12
	14	12	11	11	-	11
Maart	7	12	11	12	-	12
	14	8	3	10	-	10

Algemeen oordeel op 7 en 14 dagen na oogst, beoordeelt op een schaal van 1 tot 10 waarbij 10 een uitstekende kwaliteit is en 1 een volledig rotte vrucht is. N = 12

Periode	Dag	34-HW-322	Dee Flexion	Up Trace	Spaans Product	Nederlands product belichte teelt
December	7	5,0	7,5	5,0	7,8	-
	14	3,0	5,3	3,0	3,0	-
Januari	7	7,8	7,3	5,0	7,8	8,5
	14	5,5	5,5	4,0	5,0	3,5
Februari	7	8,0	8,5	8,0	-	8,5
	14	7,0	6,5	6,8	-	6,3
Maart	7	8,5	7,3	8,5	-	8,0
	14	5,0	4,0	5,8	-	5,0

Houdbaarheid (%) gemiddelde houdbaarheid op 7 en 14 dagen na oogst, waarbij het houdbaarheidspercentage berekend is door het algemene oordeel op de betreffende dag te delen door het algemeen oordeel van dag 1.

Periode	Dag	34-HW-322	Dee Flexion	Up Trace	Spaans Product	Nederlands product belichte teelt
December	7	100	100	100	100	-
	14	60	70	60	39	-
Januari	7	97	91	83	100	100
	14	69	69	67	65	41
Februari	7	100	100	100	-	100
	14	88	87	74	-	84
Maart	7	100	97	100	-	97
	14	59	53	68	-	61

3.3 Vereenvoudigde saldoberekening

Deze winterteelt is het vervolg op de winterteelt die heeft plaatsgevonden in 2022 - 2023. Het doel van deze teelt was om met een andere energieverdeling (meer kWh/m² voor belichting en minder m³/m² gas voor de verwarming van de kas) een hogere productie te realiseren. Uit tabel 5 blijkt dat de energie-efficiëntie inderdaad is toegenomen ten opzichte van de teelt van 2022 - 2023 (22% minder energiekosten per kg komkommer). Als de vergelijking gemaakt wordt met een hybride belichtingsteelt in de praktijk (2022), is het verschil in energiekosten per kg komkommer zelfs 46,6% lager, met een 57% lagere totale energie-input.

Echter, om op energie te kunnen besparen moet een tuinder investeren in een dubbel scherm en een ontvochtigingssysteem. Om deze investeringen te kunnen doen moet de teelt rendabel zijn. Als met de gegevens uit onderstaande tabel gerekend wordt, blijkt dat er inderdaad op energiekosten bespaard kan worden ten opzichte van de praktijk, maar daartegenover staat ook een lagere productie ten opzichte van de praktijk. Deze opbrengstreductie weegt hierbij niet op tegen de besparing in energiekosten, waardoor het voor een tuinder op dit moment nog niet rendabel is om te investeren in een dubbel scherm en ontvochtigingssysteem.

Om dit wel rendabel te maken, zal de energie-efficiëntie van de teelt verder omhoog moeten. Dit kan enerzijds door de verdeling van stroom en gas verder te optimaliseren en anderzijds door de lichtbenuttingsefficiëntie van de teelt te verhogen (ondanks de hogere energie-efficiëntie van de proef van 2023 - 2024 ten opzichte van de proef van 2022 - 2023, is de lichtbenuttingsefficiëntie in beide teelten nagenoeg gelijk geweest). Een mogelijkheid om dit te realiseren, is door het verlagen van het drogestof gehalte van de vruchten: als dit gereduceerd kan worden van 3,4% naar 2,8%, levert dit 21% meer productie op.

De hypothese is, dat wanneer de energieverdeling verder geoptimaliseerd wordt, met een gelijkblijvende lichtbenuttingsefficiëntie, de teelt rendabel is op basis van de vereenvoudigde kostenberekening in tabel 5. Hierbij is enkel rekening gehouden met de kosten van de energie en de opbrengst per komkommer. Er is gerekend met € 0,35 per kuub gas en een opbrengst van € 0,70 per komkommer. De praktijkcijfers zijn gebaseerd op een hybrideteelt van 2022.

Tabel 5: Berekende energie efficiëntie en rendabiliteit proef winterteelten '22 – '23 en '23 – '24. Er is gerekend met een komkommerprijs van €0,70/stuk en een gasprijs van €0,35.

Parameter	Proef '22-'23	Proef '23-'24	Hypothese bij optimalisatie energieverdeling	Praktijk
Stuks (aantal/m ²)	93	132,5	153,8	-
Gewicht (kg/m ²)	34	48,8	53,9	60
Lichtbenuttingsefficiëntie (g/mol PAR)	17,9	18,0	18,0	-
Elektraverbruik (kWh/m ²)	95	151	180	-
Elektra in aardgasequivalenten (m ³ /m ²)	9,7	15,4	18,4	-
Gasverbruik (m ³ /m ²)	10	7,2	4	-
Totale energie input (m ³ /m ²)	19,7	22,6	22,4	53
Kosten elektra (kWh/kg)	2,8	3,1	3,3	-
Kosten gas (m ³ /kg)	0,3	0,1	0,07	-
Energiekosten in m³ gaseq./kg komkommer	0,6	0,47	0,42	0,88

Parameter	Proef '22-'23	Proef '23-'24	Hypothese bij optimalisatie energieverdeling	Praktijk
Opbrengst kg/m ²	34	48,8	53,9	60
Vershil in productie ten opzichte van de praktijk (kg/m ²)	- 26	- 11,2	- 6,1	-
Vershil in productie ten opzichte van de praktijk (€/m ²)	- € 45,50	- € 19,60	- € 10,70	-
Kostenbesparing energie ten opzichte van de praktijk (€/m ²)	+ € 11,66	+ € 10,64	+ € 10,85	-
Over voor investeren aanpassingen kas (€/m²)	- € 33,84	- € 8,96	+ € 0,15	-

3.4 Assimilatenbalans

De aanmaak van assimilaten (source) is inzichtelijk gemaakt door metingen van de bladfotosynthese te vertalen naar gewasfotosynthese. Het verbruik ervan (sinks) is inzichtelijk gemaakt door diverse gewasmetingen en het toepassen van rekenregels uit tomatengroeimodellen. Voor een gedetailleerdere beschrijving van de methode zie Huijs et al., 2023.

3.4.1 Source

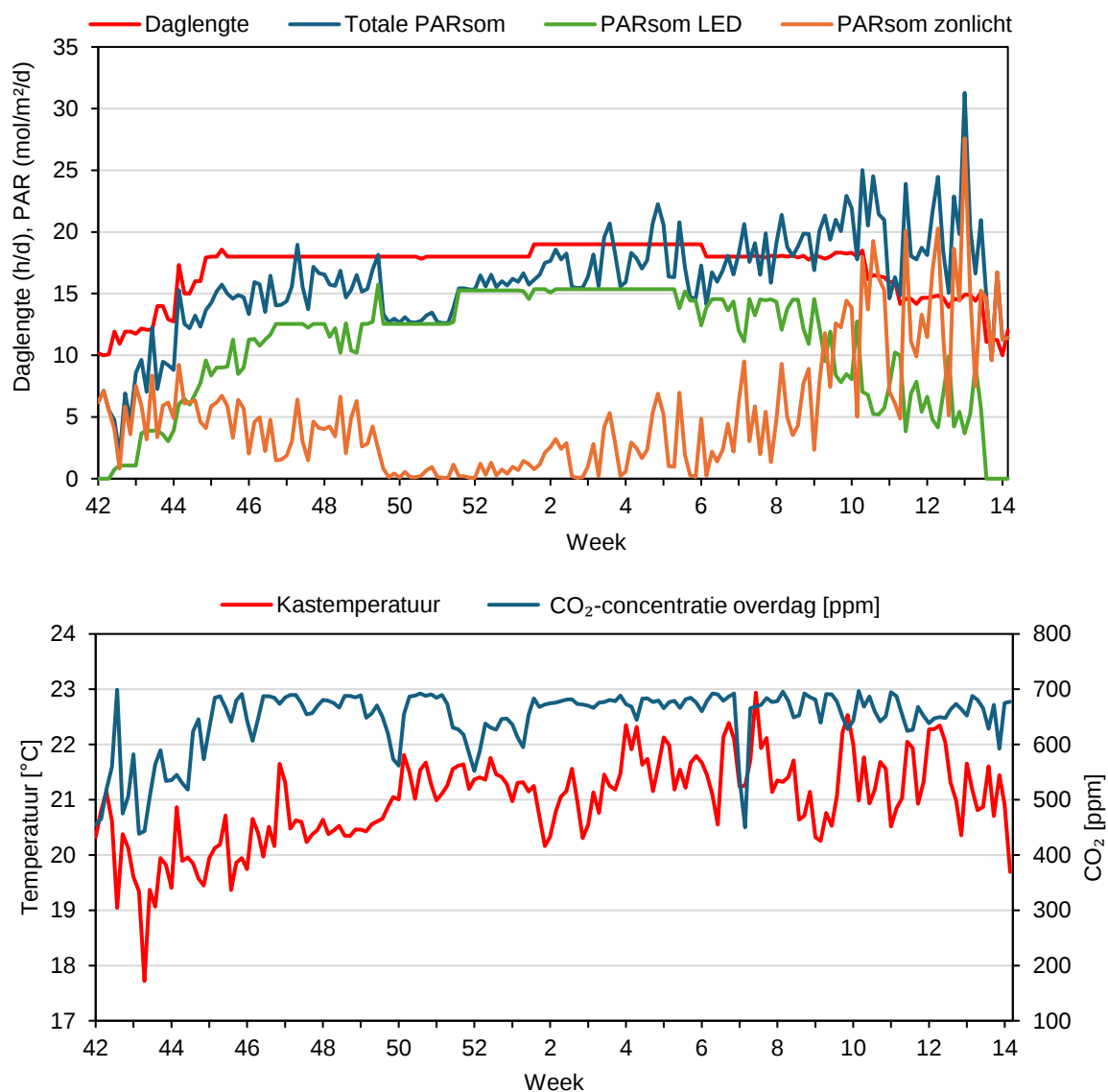
De source is berekend door de lichtintensiteit in PAR te verdelen over 10 virtuele gewaslagen op basis van de zogeheten Monsi-Saeki benadering (Monsi & Saeki, 2005). Hierbij wordt aangenomen dat het licht in het gewas exponentieel uitdooft volgens de formule:

$$PAR_n = PAR_0 \times e^{-k \times LAI}$$

Vervolgens is van deze lagen de bladfotosynthese berekend aan de hand van de PAR-intensiteit, plant- en luchttemperatuur en de CO₂-concentratie. De bladfotosynthese is omgerekend naar gram assimilaten per m² per dag op gewasniveau.

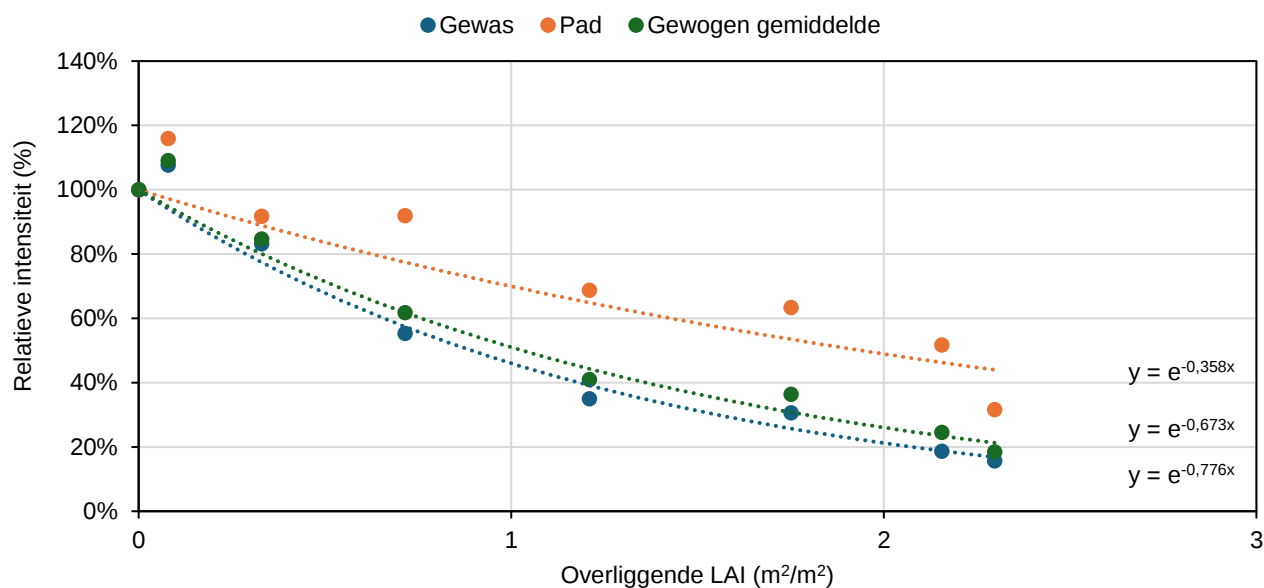
PAR in de kas en lichtuitdoving

Gedurende de hele teelt is elke vijf minuten de PAR-intensiteit in de kas geregistreerd. Daarnaast is op basis van de gemeten lichtintensiteiten bij het bepalen van de lichtverdeling en lampinstellingen de PAR-intensiteit vanuit de belichting berekend. Het verschil tussen de berekende lampintensiteiten en gemeten PAR werd genomen als de zonlichtintensiteit. Ook is de daglengte bepaald als de som van vijf-minutenpunten waarop PAR groter was dan één µmol/m²/s (Figuur 13). Vanaf week 9 nam de lichtsom uit zonlicht sterk toe, en werd de belichting afgebouwd. De totale PAR-som was 2711 mol/m², waarvan er 884 mol/m² uit zonlicht kwam en de overige 1827 mol/m² uit de LED-belichting.



Figuur 13: Dagelijkse PAR-sommen dag- en lamplicht, fotoperiode, etmaaltemperatuur en de gemiddelde CO₂-concentratie tijdens de fotoperiode gedurende de proef. De daglengte is bepaald door het optellen van het aantal vijf-minutenpunten dat de lichtintensiteit boven de één $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ was. Vanaf 29 maart (week 13) is de belichting uitgezet.

Begin december 2023 en eind februari 2024 is de lichtuitdoving in het gewas bepaald. Hiertoe is een lijnsensor (Li-191R, Line quantum sensor) gebruikt om de lichtintensiteiten op meerdere hoogtes in het gewas te meten. Deze is te relateren aan de overliggende LAI om de verticale lichtuitdoving in het gewas te verkrijgen. Doordat hoog in het gewas de stralen van meerdere lampen bij elkaar kwamen kon de intensiteit in eerste instantie toenemen naarmate men dieper in het gewas kwam (Figuur 14). De verkregen waarden voor de lichtextinctiecoëfficiënten waren aan de lage kant. Mogelijk werd dit veroorzaakt door een overschatting van de LAI, omdat de gebruikte bladoppervlakteformule gemiddeld gezien hoger uitkwam dan een ijking in februari 2024 (Bijlage V).

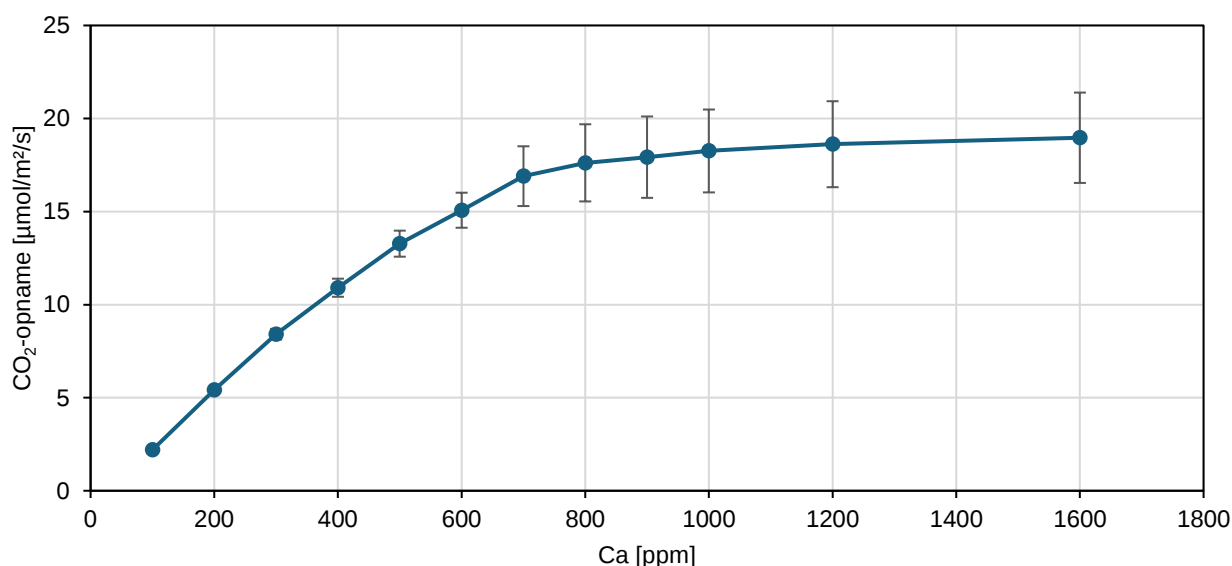


Figuur 14: Lichtuitdoving in pad en gewas gerelateerd aan de LAI van eind februari. De extinctiecoëfficiënten waren 0,689 in december 2023 en 0,673 in februari 2024.

Fotosynthese blad en gewas

Bladfotosynthese

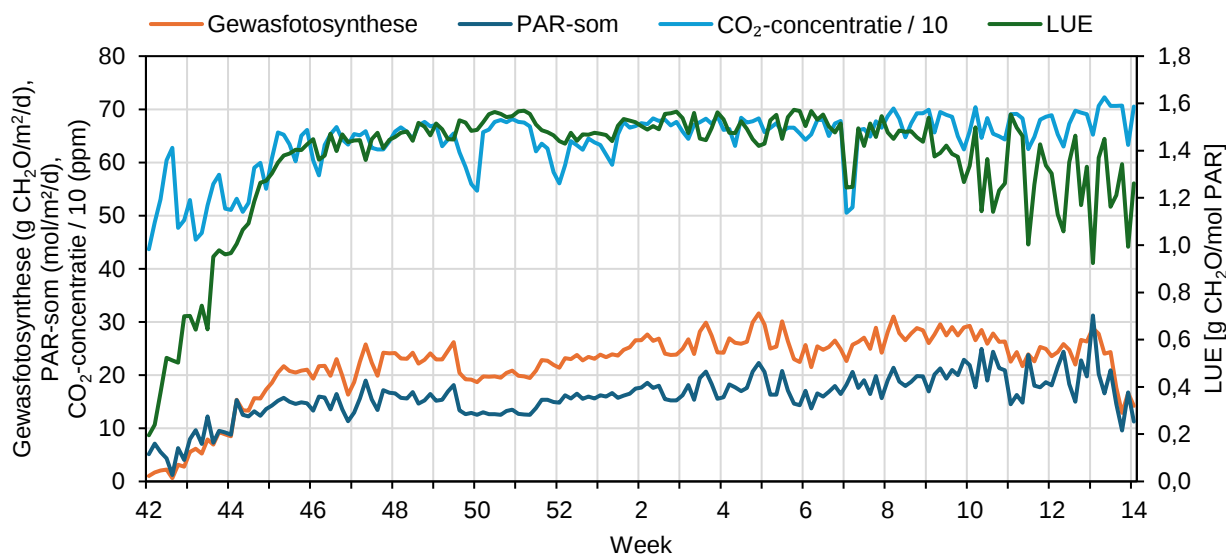
De fotosynthese-eigenschappen van de bladeren zijn tweemaal gemeten. Er trad CO₂-verzadiging op bij een concentratie van ongeveer 700 - 800 ppm (Figuur 15). De bladfotosynthese was niet wezenlijk anders dan in de winter van 2022 – 2023. Daarom is de parameterisatie voor de gewasfotosynthese onveranderd gebleven ten opzichte van dat jaar.



Figuur 15: CO₂-respons van de fotosynthese van topbladeren in februari, de metingen zijn uitgevoerd bij 1000 µmol/m²/s PAR en heersende kasttemperatuur van 25 °C (N = 4). Het andere meetmoment liet soortgelijke patronen zien.

Gewasfotosynthese

Figuur 16 geeft de gewasfotosynthese over de tijd weer. Deze lijn volgt het patroon van de dagelijkse PAR-som redelijk goed. In week 49 was de PAR-som flink lager doordat er minder zonlicht was dan in eerste instantie beoogd. Dit was goed terug te zien in de gewasfotosynthese, maar niet in de lichtbenuttingsefficiëntie in gram assimilaten/mol PAR: LUE. Ook werd er bewust nog niet meer belicht omdat een visuele beoordeling met de BCO aangaf dat het gewas een verhoogde lichtsom nog niet aankon. De eerste weken van de proef lag de lichtbenuttingsefficiëntie daarnaast lager doordat het gewas nog geen volledige LAI had ontwikkeld. Vanaf 29 maart 2024 (week 13) is niet meer belicht, waardoor de lichtsom meer varieerde in een kortere daglengte waardoor de LUE) ook lager was. In week 7 was er een verlaagde CO₂-concentratie, waardoor de LUE afnam.

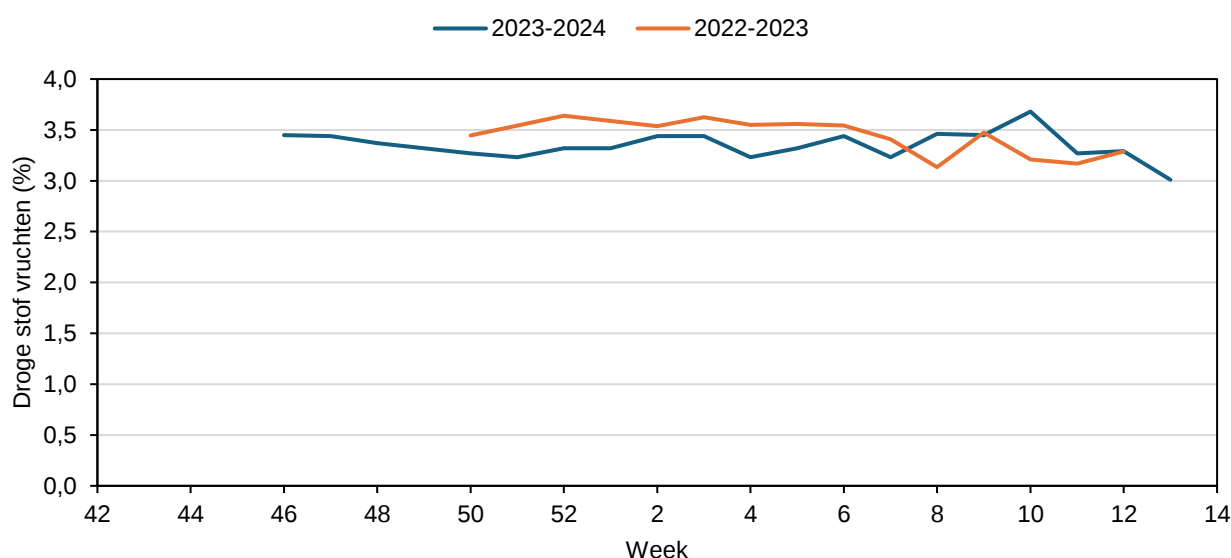


Figuur 16: Gewasfotosynthese, PAR-som en lichtbenuttingsefficiëntie in gram assimilaten / mol PAR (LUE;) gedurende de proef. De gewasfotosynthese en PAR-som volgen een vergelijkbaar patroon. In week 49 was er weinig zonlicht en was de gewasfotosynthese lager. Hierbij bleef de LUE op een gelijke hoogte. Vanaf proefweek zes nam de PAR-som gestaag toe.

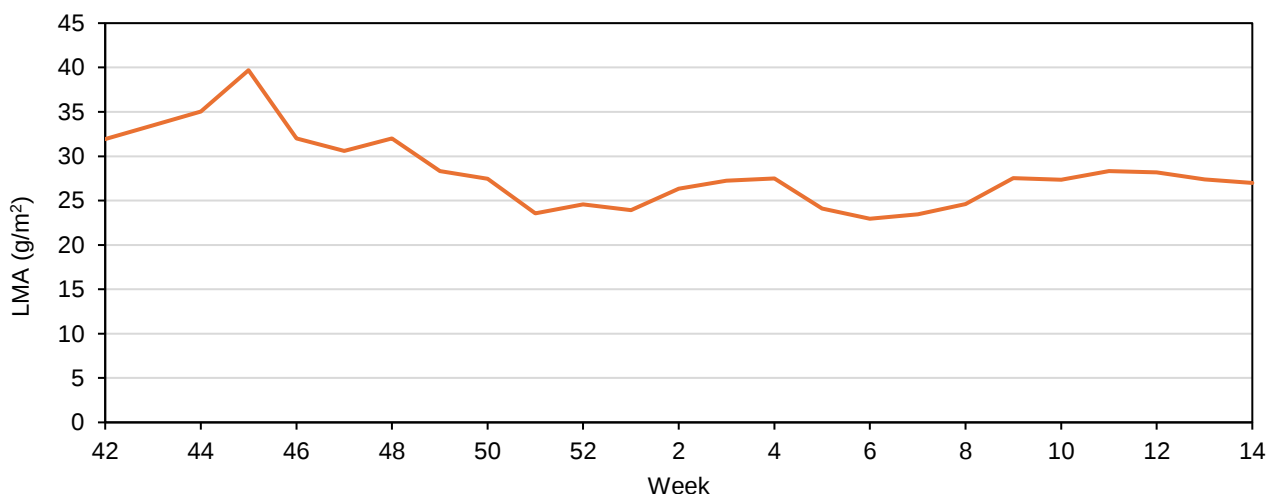
3.4.2 Sinks

De sinks bestaan bij een komkommernogewas uit de vruchten, bladeren, stengel en wortels. Aan de hand van de wekelijkse oogstcijfers, bijbehorend drogestofpercentage en de gemiddelde uitgroei duur is een wekelijkse schatting gemaakt van de assimilaten die naar de vruchten zijn gegaan. Aan de hand van de metingen van de LAI, de LMA van de bladeren, het aantal aanwezige bladeren, nieuwe bladeren en het aantal geplukte bladeren is de wekelijkse aanwezigheid en bijgroei van nieuw blad bepaald. Er werd aangenomen dat de assimilatenverdeling tussen blad/stengel/wortelverhouding niet veranderde. Verder is aangenomen dat het aandeel drogestof in de wortels 15% was van de drogestof in blad- en stengel.

Figuur 17 en 18 beschrijven het gemeten drogestofpercentage van de vruchten en de LMA van oude bladeren van zowel de huidige proef als die van vorige winter. Samen met de toename in LAI kon hieruit de bijgroei in droge stof worden berekend. Gemiddeld was het drogestofpercentage van de vruchten 3,4%. Dit is vergelijkbaar met de proef van de winter 2022 – 2023 en hoog in vergelijking met Trouwborst et al., 2010 en de praktijk. Het verlagen van het drogestofpercentage naar 2,8% zou in theorie een opbrengstverhoging van ruim 21% kunnen bewerkstelligen.



Figuur 17: Drogestofpercentage vruchten gedurende de proef van 2022 - 2023 en 2023 - 2024. Deze was redelijk consistent gedurende de proeven en was gemiddeld 3.4% in de teelt van 20'23 - 2024. In de laatste drie proefweken nam het drogestofpercentage af, in een periode waarin de plantbelasting hoger was.



Figuur 18: Het verloop van de LMA van oude bladeren (bladgewicht in g/m²) over de hele teelt.

3.4.3 Assimilatenbalans

Berekende en gemeten assimilatenverdeling

Tabel 6 geeft de gemeten drogestof-verdeling en de berekende assimilatenverdeling weer over de verschillende plantorganen. De benodigde assimilaten voor vegetatieve delen lag een stuk hoger dan de gemeten drogestof vanwege de groei- en onderhoudsademhaling en de niet gemeten droge stof in de wortel. De verdeling in gemeten- en berekende droge stof tussen vegetatieve delen en vruchten was gelijk. 48% van de assimilaten is naar de generatieve delen (vruchten) gegaan.

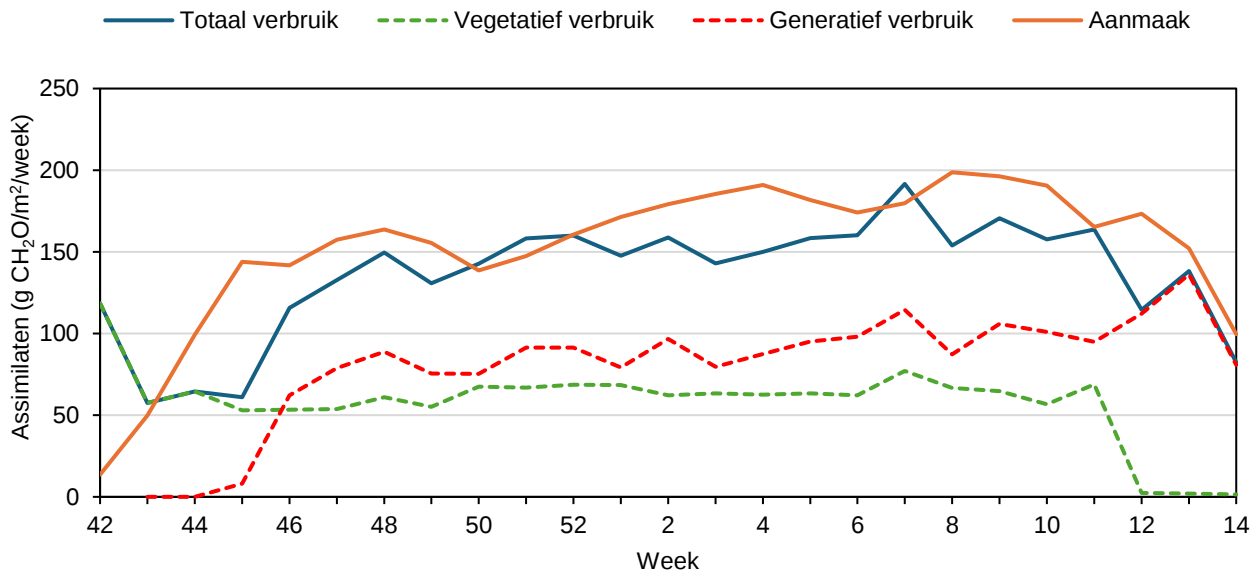
Tabel 6: Drogestof-verdeling vanuit de metingen en berekend op basis van de assimilatenbalans. De berekening bevat ook groei- en onderhoudsademhaling en is daardoor hoger. Er is geen meting aan de droge stof van het wortelgestel. In de berekening wordt aangenomen dat deze 15% van de assimilaten van blad en stengel kostte.

	Drogestof (g/m ²)		Assimilaten (g/m ²)
	Gemeten	Berekend	Berekend
Blad	639*	639	888**
Stengel	219	219	318
Wortel	?	129	179
Vruchten	1624	1624	1940
Totaal	2483	25611	3325
Vegetatief (%)	35	38	42
Generatief (%)	65	62	48

*Gebaseerd op het aantal uitgroeiende bladeren (250 per m²) en de gemiddelde droge stof per blad van 3 weken later. Omdat er 258 bladeren per m² zijn geplukt en er 36 bladeren per m² aanwezig waren bij de eind oogst is deze hoeveelheid droge stof mogelijk een onderschatting. ** Aangezien de assimilatie als netto fotosynthese wordt berekend, zit in deze post alleen de groeiademhaling verwerkt.

In figuur 19 wordt de berekende assimilatenbalans over de hele teelt weergegeven. Doorgaans lag de aanmaak van assimilaten hoger dan het totale verbruik ervan. In de laatste proefweken was de plantbelasting hoger, waardoor het generatieve verbruik van assimilaten toenam. Het gegeven dat de aanmaak van assimilaten structureel boven het verbruik lag, geeft aan dat er een overschot van assimilaten was. Op de totale proefduur was de berekende aanmaak van assimilaten 13% hoger dan het berekende verbruik. Dit is een interessant gegeven en laat potentie voor meerproductie zien: als dit in de berekende lichtbenuttingsefficiëntie samen met het te hoge drogestofpercentage wordt verdisconteerd zou er $18 \times 1,21 \times 1,13 = 24,6$ g/mol PAR worden verkregen. Deze lichtbenuttingsefficiëntie is niet ongebruikelijk voor komkommer in de winter.

Het vegetatieve verbruik van assimilaten lag gemiddeld over de hele proef op proef 56 g CH₂O/m²/week en midden in de winter rond de 65 CH₂O/m²/week. Dit is hoger dan de 'basisbehoefte' voor vegetatieve groei in de winter teelt van 2022 - 2023, waar het vegetatieve verbruik in de winter rond de 46 g CH₂O/m²/week lag. Aan het einde van de teelt werd de kop van het gewas weggenomen, waardoor de vegetatieve vraag naar assimilaten sterk afnam. Met een gemiddelde lichtbenuttingsefficiëntie van ongeveer 1,4 g CH₂O/mol PAR in deze teelt is voor de vegetatieve behoefte 5,7 mol PAR/m²/d nodig en in de winter 6,6 mol PAR/m²/d. Pas wanneer aan deze lichtsom wordt voldaan zullen extra molen PAR bijdragen aan de productie van komkommers. Meer belichten boven de vegetatieve basisbehoefte is dus in theorie gunstig, omdat elke extra mol/m² PAR bij kan dragen aan productie.



Figuur 19: Assimilatenbalans op weekbasis gedurende de proef. De aanmaak is de gewasfotosynthese op weekbasis. Het generatieve verbruik is berekend op basis van de oogst. Het vegetatieve verbruik van assimilaten is berekend aan de hand van de onderhoudsademhaling van bladeren, stengels, wortels en van de groei-ademhaling van de bijgroei van die organen.

3.4.3 Vergelijking drogestof met vorig seizoen

Er is 41% meer drogestof naar de vruchten gegaan vergeleken met het vorige seizoen met 42% meer licht (Tabel 7). De LBE is dan ook nauwelijks gestegen. Plantkundig is het grotere aantal vruchten verkregen door de hogere plantdichtheid ($2,11 / 1,7 = 124\%$ hogere plantdichtheid) en de hogere teeltsnelheid in graaddagen (121%). Dit geeft theoretisch samen 50% meer vruchtposities.

Aangezien er min of meer op dezelfde wijze gedund is (om en om) lag het meer in de lijn der verwachting dat de investering in blad en stengel ook met rond de 40% zouden zijn toegenomen. Echter, er blijkt relatief meer drogestof te zijn geïnvesteerd (68 en 65% meer voor blad en stengel). Het hogere totale bladgewicht kan dus alleen verklaard worden door een hoger gewicht per blad.

Een lichtbenuttingsefficiëntie van 21 g/mol PAR over de gehele teelt zou bij de gerealiseerde PAR-som van 2711 mol/m² een productie van $2711 \times 22 = 56,9$ kg/m² bewerkstelligd kunnen hebben. De gerealiseerde productie lag dus veel lager (48,8 kg/m², Figuur 2). Bij het om-en-om aanhouden van vruchten is bij 286 aangelegde bladeren per m² plek voor 143 vruchten/m². Bij een gemiddeld gerealiseerd vruchtgewicht van 360 g/komkommer kan dan een productie van 51,5 kg/m² worden behaald. Dit is 10% onder de theoretisch berekende productie met 21 gram/mol van 56,9 kg/m². De belangrijkste post waarmee de productie te verhogen is, is door het aanleggen/aanhouden van meer vruchten. De vruchtaanleg kan aangejaagd worden door een hogere bladafplitsingssnelheid (door een hogere temperatuur). Meer vruchten aanhouden kan worden gedaan door een ander dunningsregiem (setjes) aan te houden. Tevens is het interessant om na te gaan of er een hogere LBE dan 21 gram/mol mogelijk is. Want als er niet meer vruchten worden aangehouden dan mogelijk is voor 21 gram/mol en vruchten worden niet groter geoogst, dan wordt de limiet in gram/mol bepaald aan de voorkant van de proef bepaald door de dunningsstrategie. Bij tomaat is dit anders en kan een hogere gram/mol worden gerealiseerd door een hoger gemiddeld vruchtgewicht.

Tabel 7: Vergelijking van drogestof-productie tussen de huidige teelt en het voorgaande jaar (2022 – 2023).

Parameter	Eenheid	2022 – 2023	2023 - 2024	%
<i>Blad</i>	g/m ²	380	639	168%
<i>Stengel</i>	g/m ²	133	219	165%
<i>Vrucht</i>	g/m ²	1148	1624	141%
<i>Aandeel vruchten</i>	%	69%	65%	95%
<i>Assimilatenaanmaak</i>	g/m ²	2262	3325	147%
<i>PAR-som</i>	mol/m ²	1914	2711	142%
<i>Etmaaltemperatuur</i>	°C	19,6	21,0	107%
<i>Proefduur</i>	d	169	169	100%
<i>Graaddagen (Tb = 10)</i>	°Cd	1632	1970	121%
<i>Aantal bladeren</i>	#/m ²	201	250	124%
<i>Aantal vruchten</i>	#/m ²	93	133	143%
<i>Gemiddelde LMA</i>	g/m ²		28	-
<i>Gemiddelde bladlengte</i>	cm	27,2	32,7	120%
<i>Totale stengellengte</i>	cm/stengel	1025	1258	123%

4. Energie

In dit hoofdstuk wordt de energiebalans van de kas opgesteld. Achtereenvolgens komen de energiestromen via de buiswarmte, de belichting, het Air & Energy-systeem, het kasdek (isolatie door scherming), de verdamping aan de orde en wordt de energiebalans opgesteld voor en na week 2. Een belangrijk leerpunt voor het besparen van energie werd namelijk opgedaan in week 2. In die week is namelijk het maximale debiet van het Air & Energy-systeem verlaagd van $30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ naar $12 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{uur}$. Dit had twee gevolgen:

- Er kwam minder koude buitenlucht de kas, waardoor er minder buiswarmte nodig was om die lucht op temperatuur te brengen.
- De totale luchtstroom in de kas nam af, waardoor ook de verdamping in mL/mol PAR afnam.

Tegelijkertijd was er ook een toename in lichtintensiteit vanwege een iets hogere assimilatiebelichting en meer zonlicht. Hierdoor zijn beide afzonderlijke effecten lastiger te visualiseren en kwantificeren. Lampwarmte draag namelijk ook bij aan kasopwarming. Aangezien meer licht ook de verdamping aanjaagt geldt hierbij een belangrijke voorwaarde: de stijging in verdampingsenergie moet minder zijn dan de stijging in lichtenergie. Alleen dan gaat extra lampwarmte effectief bijdragen aan kasverwarming.

Op basis van de data zijn er enige weken klimaat gemiddeld voor en na week 2. De keuze is gemaakt om te focussen op de winterweken. De eerste en de laatste weken zijn namelijk niet representatief voor de winter. Er is gekozen om de volgende weken te middelen:

- Voor week 2: week 47 - 1
- Na week 2: week 3 - 7

Omdat er met zowel gas- als elektra is gerekend aan energie, zijn er met de eenheden MJ, kWh en m^3 aardgas(equivalenten) gewerkt. In dit hoofdstuk zijn daarbij de volgende omrekeningsfactoren gebruikt:

- $1 \text{ m}^3 \text{ aardgas} = 35,17 \text{ MJ}^1$
- $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$
- $1 \text{ m}^3 \text{ aardgas} = 9,8 \text{ kWh}^2$

Bovenstaande getallen laten zien dat er ruwweg een factor 10 zit in de omrekening van 1 m^3 (aard)gas naar 1 kWh elektriciteit. Er is in deze getallen geen rekening gehouden met de efficiëntie van de verwarmingsketel en WKK of andere verliezen die bij warmte- of elektriciteitstransport kunnen optreden.

² NB er is gerekend met de calorische bovenwaarde voor gas om getallen vergelijkbaar te houden met seizoen 2022 - 2023; Huijs et al., 2023. De calorische onderwaarde voor gas is $31,65 \text{ MJ/m}^3$ ($8,8 \text{ kWh/m}^3$).

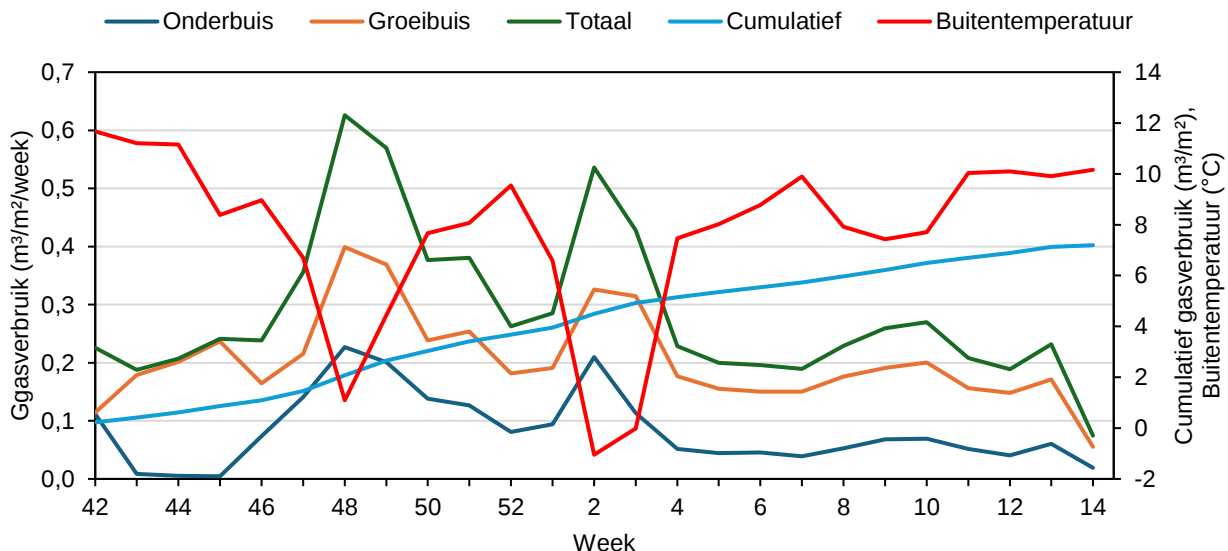
4.1 Warmteverbruik via buiswarmte

De energie die nodig was voor kasverwarming is berekend via de gemeten buistemperatuur (Nawrocki, 1985). De rijbreedte was 1,70 m. Binnen deze rijbreedte bevonden zich twee 51 mm buizen (buisrail) en een 35 mm buis in het gewas (groeibuis). Er is gerekend met een bruto verbruik van de kas (volledige buislengte van alle buizen in de kas) en het netto verbruik per m² teelt. Een proefkas heeft ten opzichte van het oppervlak namelijk zo'n factor 6 meer gevel dan een commerciële kas:

- Proefkas van 18 m bij 14,5 m: $2 \times (18 + 14,5) \times 6 \text{ m} = 390 \text{ m}^2$ gevel
 - Op 261 m² kasoppervlakte is dit 1,5 m²/m² aan geveloppervlakte
- Commerciële kas van 100 m bij 100 m: $2 \times (100 + 100) \times 6 = 2400 \text{ m}^2$ gevel
 - Op 10.000 m² kasoppervlakte is dit 0,24 m²/m² aan geveloppervlakte

Daarom is in het winterseizoen 2022 - 2023 de aanname gedaan dat de extra buizen aan de noordgevel (tevens buitengevel) van de kas voldoende waren om het energieverlies aan de gevel te compenseren. Met die aanname bleek de gevelcorrectie 40% te zijn. In bijlage VI staat een verbeterde methode om de gevelcorrectie te berekenen. Hieruit blijkt dat de gevelcorrectie waarschijnlijk groter is dan de gebruikte 40% en afhankelijk van de buiten- en corridortemperatuur. Figuur 20 geeft het gasverbruik uit de verschillende buistypes weer. Hierin is de gevelcorrectie van 40% verrekend. In totaal is er 7,2 m³/m² aan gas gebruikt. Dit was iets meer dan de beoogde 6 m³/m². Omdat de gevelcorrectie waarschijnlijk groter was is het berekende gasverbruik in werkelijkheid dus vermoedelijk lager.

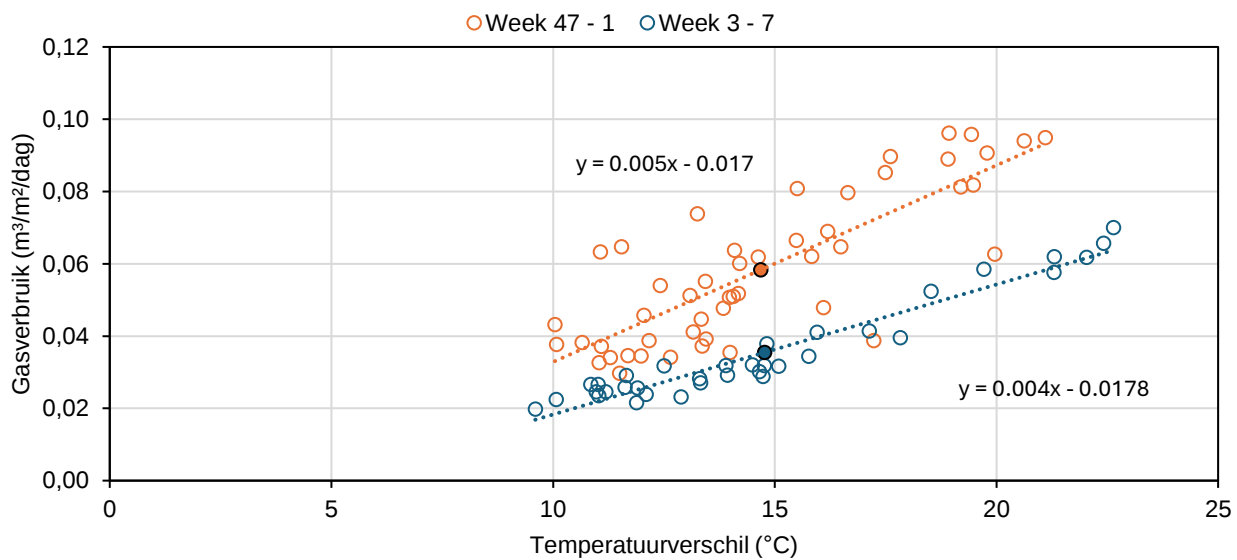
Een effect van het in de vorige paragraaf besproken leerpunt voor energiebesparing is weergegeven in figuur 21. De algemene trend in het gasverbruik per dag bij het temperatuurverschil tussen binnen en buiten was toenemend (bij lagere buitentemperaturen is er een grotere vraag naar (buis)warmte). Voor en na week 2 is een duidelijk verschil te zien, waarbij de warmtevraag per graad Celsius verschil kleiner was na week 2. De helling van de trendlijn geeft aan dat er voor week 2 0,005 m³/m²/°C nodig was om de kastemperatuur op niveau te houden, en na week 2 0,004 m³/m²/°C. Dit verschil van 25% is ook zichtbaar in het totale warmteverbruik in die periodes in tabel 8. Het temperatuurverschil tussen binnen en buiten was in de periode na week 2 groter dan daarvoor, terwijl de totale vraag naar buiswarmte lager was. Deze trendbreuk heeft zoals vermeld een drievoudige oorzaak: door lager debiet minder koude buitenlucht en een lagere verdamping en een (iets) hogere PAR-som van dag- en lamplicht.



Figuur 20: Buiswarmte in m³/m² uit de onderbuis (buisrail; donkerblauw) en groeibuis (oranje). In week 48 en 2 was de buitentemperatuur laag en was de buisvraag hoog om de kastemperatuur op niveau te houden. In week 10 is de belichting deels afgeschakeld waardoor de totale warmtevraag voor een groter deel door de buis werd opgevangen.

Tabel 8: Gemiddeld wekelijks warmteverbruik en gemiddelde temperaturen voor de periodes van week 47 – 1 en week 3 – 7. Na week 2 was het warmteverbruik lager, terwijl het temperatuurverschil tussen binnen en buiten vergelijkbaar was.

Parameter	Eenheid	Week 47 – 1	Week 3 – 7
Warmteverbruik	m ³ /m ² /week	0,41	0,25
Kastemperatuur	°C	21,0	21,6
Buitentemperatuur	°C	6,3	6,8
Temperatuurverschil ($T_{\text{binnen}} - T_{\text{buiten}}$)	°C	14,7	14,8

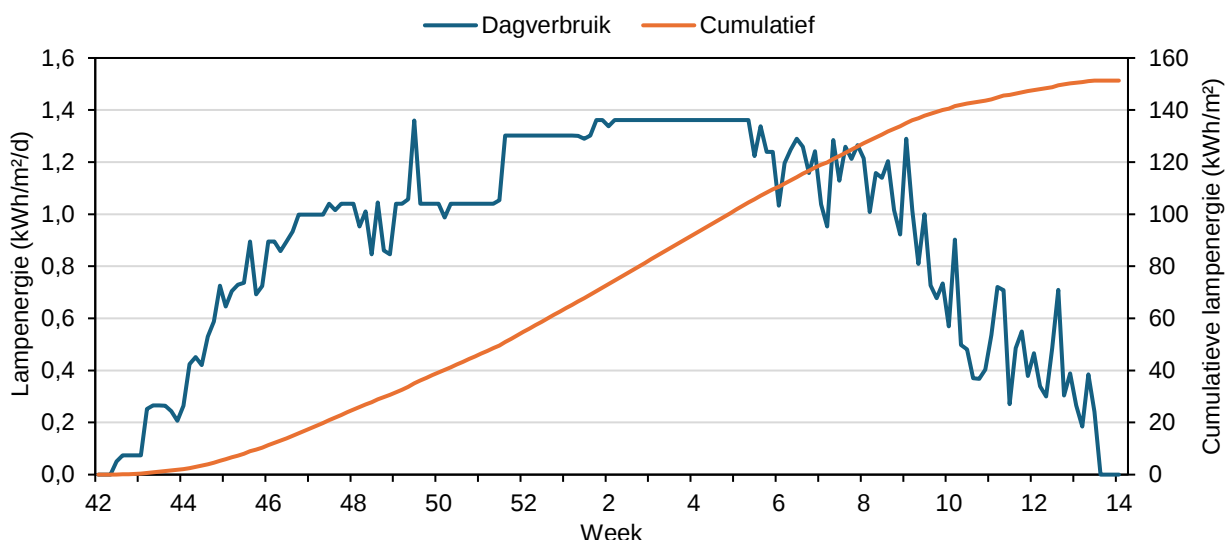


Figuur 21: Gasverbruik en temperatuurverschil (binnen – buitentemperatuur) per dag voor de periodes van week 47 – 1 en week 3 – 7 (oranje en blauw). Ieder punt vertegenwoordigt één dag. Het gemiddelde in beide periodes is weergegeven als een gevulde cirkel met zwarte omtrek. De helling van de trendlijn geeft een indruk van de toename in warmtebehoefte per graad Celsius.

4.2 Elektriciteitsverbruik van de lampen

Aan de hand van de 5-minutenwaarden van de belichtingsintensiteit en het gebruikte spectrum is het elektriciteitsverbruik berekend. Tabel 9 geeft de lampefficiëntie van de gebruikte spectra en de branduren daarvan weer. Er is gerekend met een toenemende efficiëntie wanneer er gedimd werd. Hierbij was er tot 50% dimstand een lineaire toename van de efficiëntie van 10%. De lampen worden namelijk efficiënter wanneer deze gedimd zijn.

Zoals te zien is in figuur 22 nam het dagverbruik van elektra toe tot week 2, waarna deze in week 5 weer afnam. In week 49 is één dag meer belicht, maar in overleg met de BCO werd toen besloten om toch nog minder te belichten, omdat het gewas er op dat moment niet aan toe was vanwege een visuele onbalans in licht/temperatuurverhouding: te lage temperatuur voor de hoeveelheid licht. In week 13 is besloten de lampen af te schakelen. Op dat moment was er in totaal 151 kWh/m² aan elektra verbruikt voor de belichting. Ook dit was iets meer dan de beoogde 140 kWh/m². Er is 5 kWh/m² extra gebruikt om de donkere winter te compenseren.



Figuur 22: Dagelijks en cumulatief elektraverbruik van de lampen over de teelt. Per 5-minuten is aan de hand van de efficiëntie van het spectrum en de intensiteit het elektraverbruik bepaald.

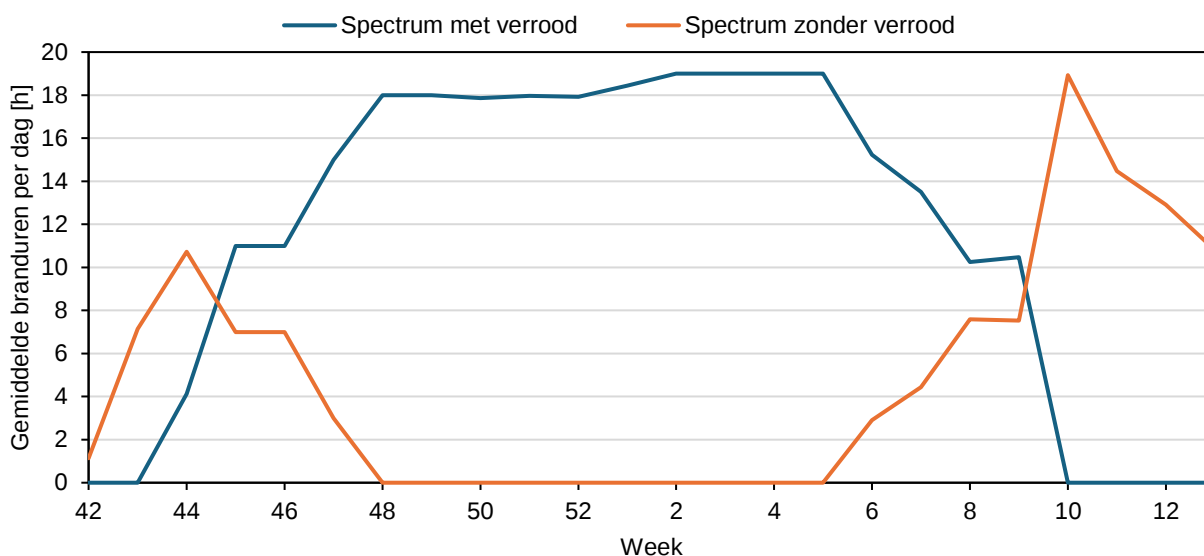
Tabel 9: Branduren per spectrum over de hele proef en de lampefficiëntie van de spectra. De lampefficiëntie nam lineair met 10% toe tot 50% dimstand. In de weken met voldoende daglicht, is elektriciteit bespaard door te belichten met een energetisch efficiënter spectrum.

Spectrum	Branduren [h]	Lampefficiëntie [$\mu\text{mol/J}$]
R-B	472	3,8
R-W-B	348	3,6
R-B-FR	483	3,6
R-W-B-FR	1441	3,4
Uit	1313	-

4.2.1 Lichtspectrum en verrood-behoefte

Verrood licht is essentieel om bladkrulling te voorkomen (Trouwborst et al., 2010; Hogewoning et al. 2012; Huijs et al., 2023). De bladkrulling lijkt te worden veroorzaakt doordat de cel-strekking niet gelijkmatig plaats vindt: meer strekking aan de bovenkant ten opzichte van de onderkant van het blad. Cel-strekking wordt voor een groot deel gereguleerd door fytochroom B, welke wordt aangestuurd door de momentane verhouding van rood/verrood licht alhoewel end-of-day verrood licht ook zou kunnen helpen (Kozuka et al., 2013). In het verleden is proefondervindelijk aangetoond dat 10% verrood ten opzichte van PAR voldoende is om bladkrulling te voorkomen. Zonlicht bestaat uit ongeveer 30% verrood met een golflengte tussen de 700 – 800 nm. De aanwezigheid van verrood in het spectrum van de belichting is daarom vooral tijdens de daglichtloze uren van belang. Aangezien verrode LED's een relatief lagere efficiëntie hebben (ten opzichte van bijvoorbeeld rode LED's) en het slecht benut wordt voor de fotosynthese is het zaak om zoveel mogelijk te bezuinigen op de inzet van verrood. De lampefficiëntie stijgt dan namelijk van 3,4 naar 3,6 $\mu\text{mol/J}$.

Figuur 23 laat de inzet van verrood over de teelt zien. Aan het begin van de proef is verrood zo lang mogelijk uitgelaten. Dit is gelukt tot en met week 44 (eind oktober) waar de verhouding tussen lamplicht en zonlicht rond de 50%/50% lag. Daartussen is in december en januari voornamelijk belicht met een spectrum waar verrood aan toegevoegd was. Door verrood uit te zetten op momenten met voldoende zonlicht is over de hele proefperiode 3% aan elektra voor de belichting bespaard. Daar bovenop is nog eens 2% bespaard door dynamisch te dimmen (Tabel 10).



Figuur 23: Weekgemiddelde van de inzet van verrood. Verrood stond óf aan óf uit (9% van het spectrum in PFD). Te zien is dat voornamelijk in de donkerste maanden is belicht met extra verrood licht. Tegen het einde van de teelt werd in de belichtingsuren afgebouwd.

Tabel 10: Besparing door de (combinatie van) verschillende belichtingsstrategieën. Door zowel het verrode licht dynamisch uit te schakelen en te dimmen kon 5% aan elektra voor de belichting worden bespaard. De besparing is cumulatief weergegeven, door te dimmen wordt boven op de besparing van het dynamisch inzetten van verrood nog eens 2% bespaard.

	Verbruik (kWh/m ²)	Besparing (%)
Vast spectrum: RWBFR	159	0
Dynamisch verrood uit	154	3
Gerealiseerd in proef: Besparing door verbetering efficiëntie door dimmen	151*	5

*De doelstelling was 140 kWh/m² en is dus overschreden. Hiervan was ruim 5 kWh/m² extra verbruikt om de donkere winter te compenseren: er was 66 mol/m² PAR minder uit zonlicht dan het langjarig gemiddelde.

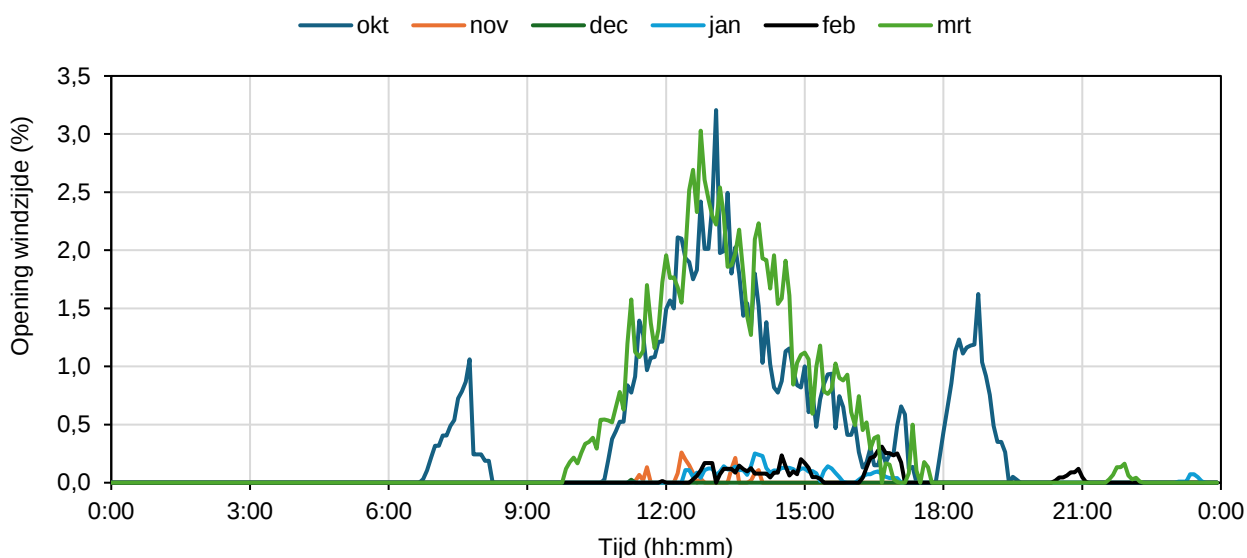
4.3 Air & Energy-systeem

Elektriciteitsverbruik

Voorafgaand van de proef is de schatting gedaan dat het verbruik van het Air & Energy-systeem 5 kWh/m² zou gaan kosten gedurende 25 weken gebruik. Met de kWh-meter is gemeten dat het Air & Energy systeem gedurende de gehele teelt 3 kWh/m² heeft gekost.

Luchting

Figuur 24 geeft de cyclisch gemiddelde luchting per maand aan de windzijde van de kas weer. Er is hoofdzakelijk gelucht in de maanden oktober 2023 en maart 2024. In maart werd er vooral gelucht tussen 10:00 – 17:00, terwijl in oktober de ramen ook tussen 7:00 – 8:00 en 18:00 – 19:30 open stonden. Omdat er gebruik kon worden gemaakt van het Air & Energy-systeem om te ontvochtigen rest er nog de vraag of er niet nog meer energie bespaard had kunnen worden wanneer de ramen (vaker) gesloten waren gebleven. In de weken van oktober en maart werd er namelijk ook nog buiswarmte in de kas gebracht, en ging die warmte deels verloren via luchting. Daarnaast was er in maart een grote toename in inkomende zonnestraling in de kas (Figuur 13), wat ook bij had kunnen dragen aan het verminderen van warmte-input via de buis.

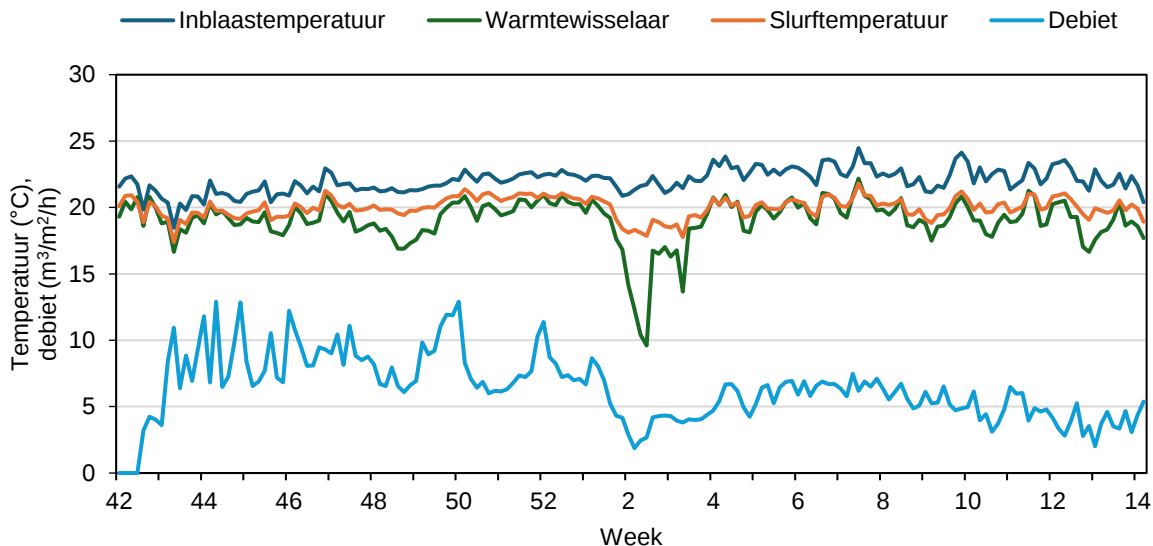


Figuur 24: Cyclisch gemiddelde opening van de ramen aan de windzijde van de kas. In de maanden oktober 2023 en maart 2024 is er meer gelucht dan in andere maanden.

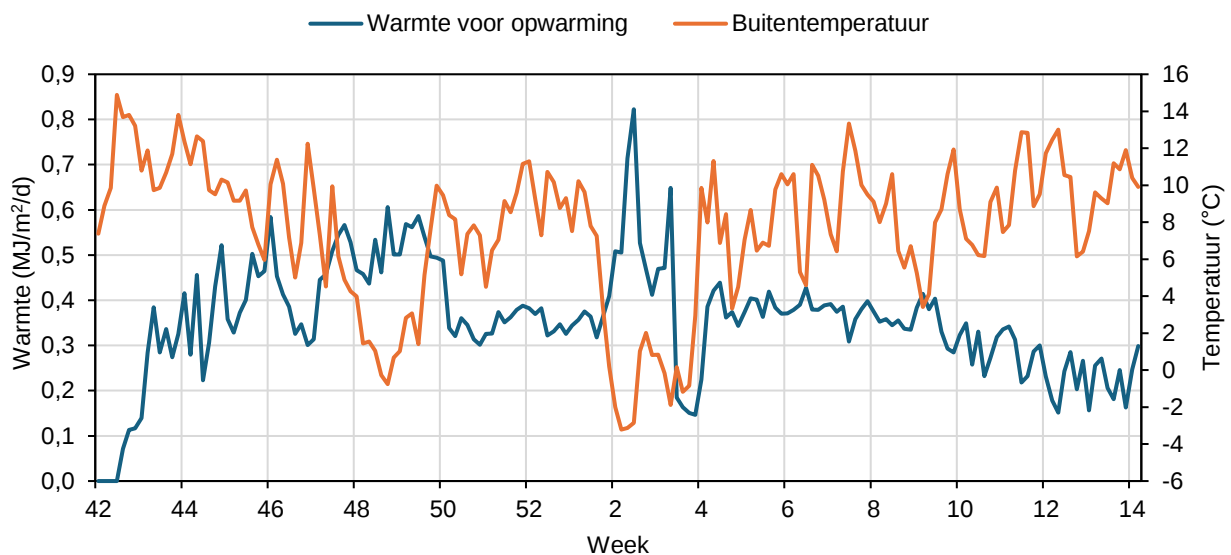
Debiet en gevolgen klimaat en gasverbruik

In week 2 werden de laagste buitentemperaturen geregistreerd (gemiddeld $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Toch werd er minder buiswarmte ingezet dan in week 48, de op één na koudste periode waarin het gemiddeld $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ was (Figuur 26). In week 2 week werd geconstateerd dat door het verlagen van het maximale debiet van het Air & Energy-systeem van $30\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ naar $12\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ energie bespaard kon worden (Figuur 25). Door het debiet te verlagen werd er namelijk minder koude lucht van buiten naar binnen gebracht. Het verwarmen van de koude buitenlucht kost energie, om één m^3 lucht met $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ op te warmen is ongeveer 916 J nodig. Een vergelijkbare situatie deed zich voor in week 50, waar het gemiddelde debiet ook lager was ten opzichte van de periode daarvoor. In figuur 26 is te zien dat er vanaf dat moment ook iets minder warmte nodig is om de binnenkomende buitenlucht op te warmen. Op het totaal is het effect van de debietverlaging op de kosten van energie voor opwarming klein, namelijk $0,08\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{week}$ aan aardgasequivalenten (Tabel 11). Naast de vermindering in de warmte voor opwarming van koude buitenlucht is ook de relatieve verdamping verlaagd na week 2 (Paragraaf 4.4). Dit had een veel groter effect op het energieverbruik.

Een andere stuurparameter voor het gebruik van het Air & Energy-systeem is het vochtdeficit (VD). In week 50 is een sensor van het Air & Energy-systeem vervangen omdat deze te hoge RV-waarden aangaf waardoor er meer gedroogd werd dan nodig. Hierdoor is na het vervangen een schijnbare toename in VD te zien. Ook is na week twee een toename in de VD in de nacht zichtbaar (Figuur 27).



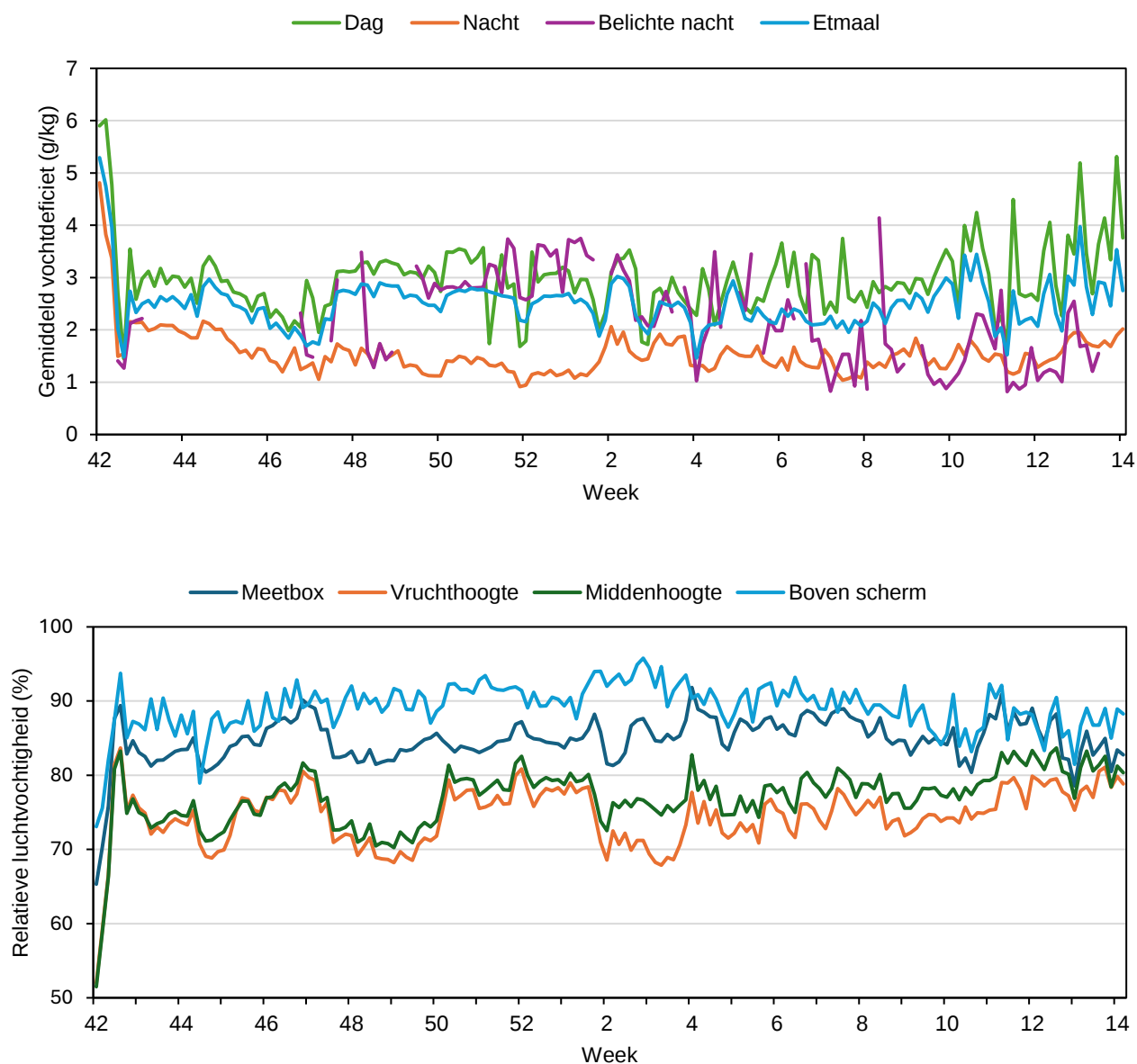
Figuur 25: Gemiddelde etmaaltemperatuur van inblaaslucht (de lucht die de kas in wordt gebracht), warmtewisselaar en slurf en het etmaalgemiddelde debiet. De grootste trendbreuk is zichtbaar in week 2 vanwege de verlaging van het maximale debiet van 30 naar 12 m³/m²/h. Hierdoor werd minder koude lucht de kas in gebracht en werd de relatieve verdamping verlaagd.



Figuur 26: De energie per dag die nodig is om de binnenkomende lucht via het Air & Energy-systeem tot kastemperatuur op te warmen. In de koudste periodes van de proef (week 48 en week 2) is meer energie nodig. Vanwege de verlaging van het maximale debiet van 30 naar 12 m³/m²/h werd minder koude lucht in de kas gebracht en nam de energievraag voor de opwarming daarvan iets af. De warmte voor opwarming is berekend uit het temperatuurverschil tussen de warmtewisselaar en ingeblazen lucht maal het opgewarmde volume lucht maal de soortelijke warmte van (droge) lucht.

Tabel 11: gevolgen van de verlaging van het debiet op de benodigde energie voor opwarming.

	Debiet (m ³ /m ² /h)	Warmte voor opwarming (MJ/m ² /d)	Aardgaseq./week (m ³ /m ² /week)
Week 47-1	8,0	0,42	0,079
Week 3-7	5,8	0,37	0,069

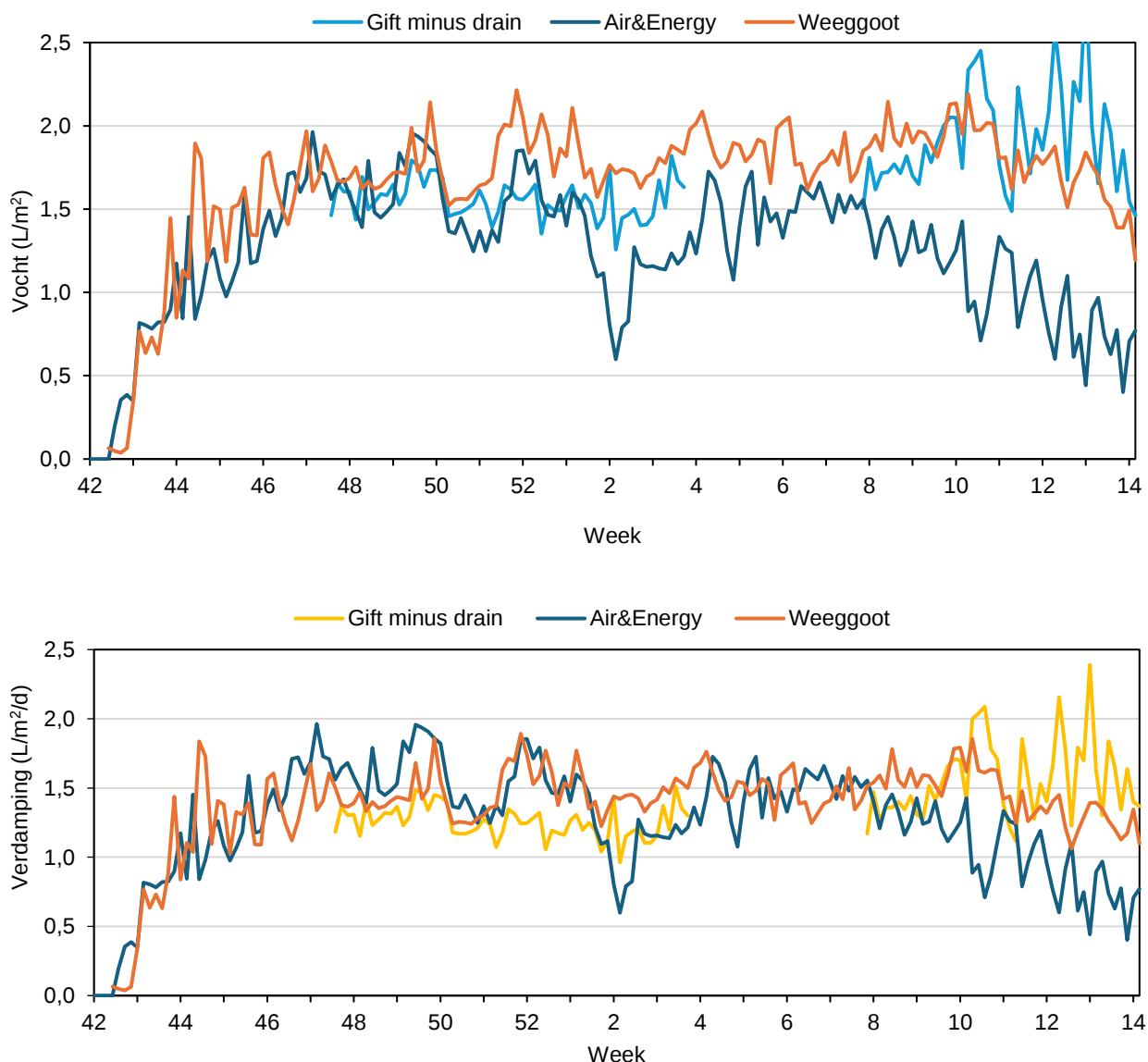


Figuur 27: Het gemiddelde vochtdeficiet (VD) gedurende de proef voor de dag, nacht, belichte nacht en over het etmaal en de etmaal-RV op verschillende kashoogtes. In week 50 is een vochtsensor vervangen waardoor in eerste instantie een lage VD werd gemeten. De belichte dag en nacht zijn de periodes waarin belicht wordt met en zonder natuurlijk daglicht. Er was niet elke dag een belichte nacht, waardoor de lijn onderbroken is.

4.4 Verdamping

De opname van water is op drie manieren berekend (Figuur 28). Dit is gedaan door de gewichtsverandering over de tijd te volgen met de weeggoet, door deze te berekenen uit gift minus drain en via de ontvochtiging van het Air & Energy-systeem. Door de opname van water in vruchten (met de aanname dat de vruchten voor 100% uit water bestaan) hiervan af te trekken kon de verdamping worden geschat. De wateropname in de wortels, stengel en bladeren wordt hierbij verwaarloosd. De berekening via het Air & Energy-systeem weerk van de overige methoden af, omdat het geen rekening houdt met vochtverlies via luchten of condensatie aan de ramen. Dit is goed zichtbaar vanaf week 9.

Verdamping kost energie. De verdampingswarmte van water (de hoeveelheid energie die benodigd is om 1 g water te verdampen) is 2450 J/g. Om 1 liter water te verdampen is dus 2450 kJ nodig, wat 0,07 m³ in gasequivalenten is. Bij een gemiddelde verdamping van ~1,5 L/m²/d is er dus bijna 0,1 m³/m²/d gasequivalenten aan energie nodig voor de verdamping, of ook wel 0,7 m³/m²/week. Daarnaast kost het ook nog eens energie om dit vocht af te voeren omdat uitgewisselde kaslucht met buitenlucht weer opgewarmd moet worden. Elke verdampte milliliter water moet dus 'dubbel' worden betaald. Hierin biedt het Air & Energy-systeem wel voordeel, omdat energie uit de uitgaande lucht wordt gebruikt om inkomende lucht weer op te warmen (Huijs et al., 2023).



Figuur 28: Wateropname en Verdamping berekend via de gewichtsverandering via weeggoten, via gift minus drain en als ontvochtiging van het Air & Energy-systeem. Voor de berekening van de verdamping is de dagelijkse opname van water in vruchten verrekend.

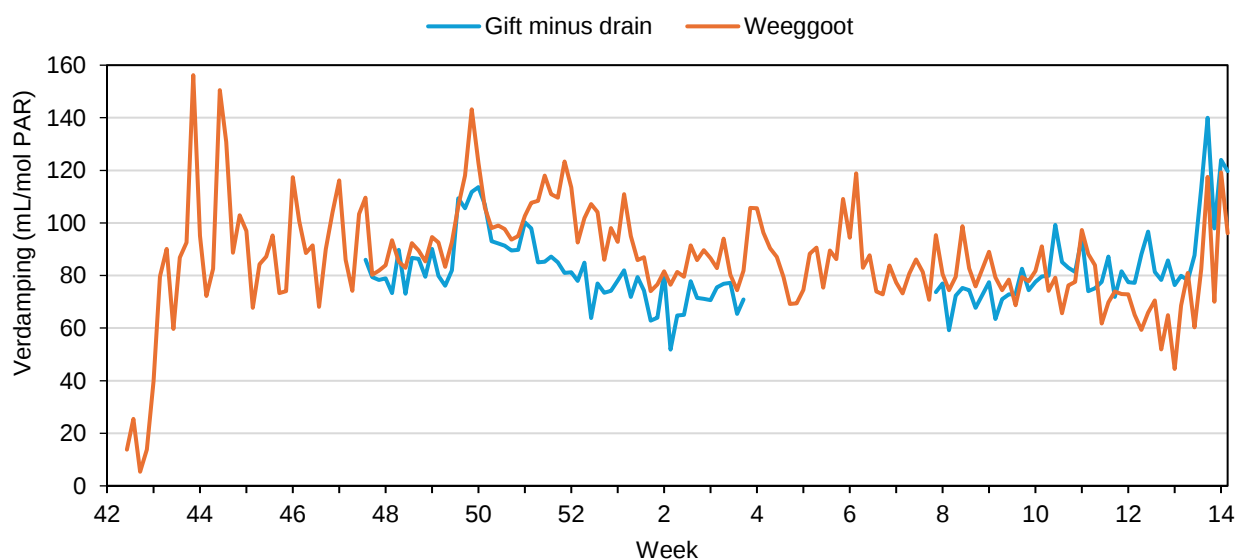
Figuur 29 geeft de relatieve verdamping uitgedrukt in mL/mol PAR op dagbasis over de teelt weer. De relatieve verdamping is de dagelijkse verdamping gedeeld door de dagelijkse PAR-som. De relatieve verdamping is een versimpelde weergave en is een platgeslagen getal per etmaal. Er is geen rekening gehouden met een scheiding tussen dag- en nachtverdamping. Daarnaast is straling niet de enige energiebron achter verdamping. Er is ook convectieve warmteoverdracht van kaslucht naar blad. In bijlage VII is de vochtbalans verder uitgewerkt.

In de winter van 2022 – 2023 werd doorgaans een relatieve verdamping van 120 mL/mol PAR gerealiseerd. In deze proef is gepoogd de verdamping per mol PAR te beperken en er is meer belicht, waardoor de verwachting was dat de relatieve verdamping af zou nemen en er meer lampwarmte over zou blijven voor het opwarmen van de kas. Wanneer de relatieve verdamping op een gelijk niveau met de proef van 2022 - 2023 zou blijven, zou er namelijk niet op buiswarmte bespaard zijn omdat de lampenergie ruimte biedt voor 120 mL/mol PAR verdamping. Meer belichten voegt dan netto niet meer energie toe aan de energiebalans omdat al deze energie opgaat aan extra verdamping. Omdat de relatieve verdamping voor het grootste deel van de proef ruim onder de 120 mL/mol PAR is gebleven (Tabel 12), kan gesteld worden dat de extra belichting ten opzichte van het seizoen 2022 - 2023 heeft bijgedragen aan het verwarmen van de kas.

Tabel 12 laat ook zien dat vanaf week 2 de PAR-som gemiddeld met 2,5 mol/m²/dag is toegenomen. De absolute opname gemeten via de weeggoot is echter slechts met 20 mL/m²/d toegenomen (berekend vanuit de weeggoot) maar de relatieve verdamping is met 12 mL/mol gedaald. De vraag kan gesteld worden of de relatieve verdamping nu gedaald is door het hogere lichtniveau of primair door de verlaging van het debiet. Als het laatste het geval is, dan zou bij een gelijke lichtsom van 16 mol/m²/d de besparing in verdampingsenergie 0,09 m³/m² aardgaseq. per week zijn geweest (16 mol/m²/d x 12 g/mol x 7 d x 2450 J/g). Dit effect is veel groter dan het effect van het debiet op de benodigde opwarmingsenergie (paragraaf 4.3). Hoe dan ook is de balans voor en na week 2 (week 47 – 1 en 3 – 7):

- Gemiddeld 20 mL/m²/d extra verdamping = 0,34 MJ/m²/week extra energiekosten.
- Een extra energietoevoer vanuit PAR van 2,5 mol/m²/d / 3,4 μ mol/J = 5,1 MJ/week extra energiekosten.
- Een netto energietoevoer van 4,8 MJ/week voor het opwarmen van de kas

De extra belichting gaf hiermee een netto bijdrage van 0,14 m³/m²/week aan de energiebalans van de kas.



Figuur 29: Relatieve verdamping in mL/mol PAR voor de verdamping uit de weeggoten en de gift minus drain.

Tabel 12: Wateropname planten via drie systemen.

	Week 47 - 1	Week 3 - 7
<i>Gift minus drain (L/m²/dag)</i>	1,56	1,61
<i>Weeggoot (L/m²/dag)</i>	1,78	1,84
<i>Air&energy (L/m²/dag)</i>	1,57	1,44
<i>PAR (mol/m²/dag)</i>	15,2	17,7
<i>Opname Weeggoot/PAR (mL/mol PAR)</i>	118	105
<i>Verdamping/mol PAR (door vruchten ~20 mL/mol PAR opslag)</i>	98	86

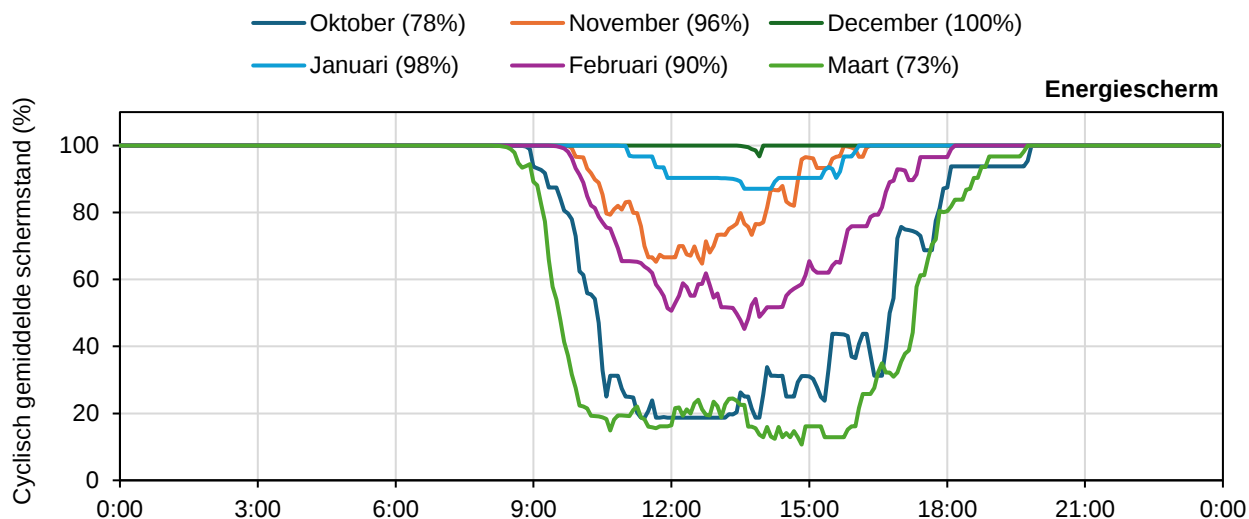
4.5 Inzet schermen

Scherming bepaalt voor het grootste gedeelte het energieverlies door het kasdek. Door intensief schermen kan de warmtedoorgangscoefficiënt fors worden verlaagd. In dit rapport zijn de volgende U-waarden uit tabel 13 gebruikt.

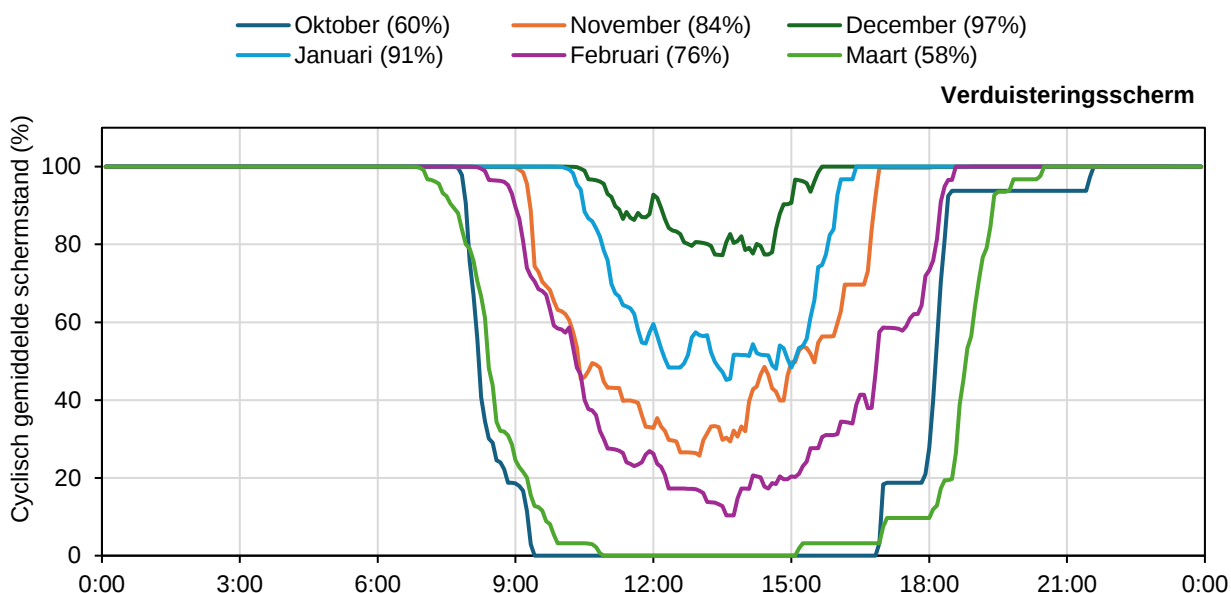
Tabel 13: U-waarden van verschillende aspecten/oppervlaktes van de kas (de eerste 4 waarden zijn afkomstig van een studie van Fjo de Ridder, Thomas More).

Oppervlakte	U-waarde [W/m ² /°C]
<i>Kasdek met gesloten energiedoek</i>	2,7
<i>Kasdek met gesloten lichtuitstootdoek</i>	3,2
<i>Kasdek met beide schermen</i>	1,6
<i>Kasdek zonder schermen</i>	5,2
<i>Corridor zuidzijde (transparant plastic)</i>	4
<i>Corridor oostzijde (bolletjesplastic)</i>	3
<i>Buitengevel (verduisteringsscherm)</i>	3

Figuren 29 en 30 geven de cyclisch gemiddelde schermstand van het energie- en verduisteringsscherm per maand weer. De opening van de schermen lieten een patroon met de seizoenen zien. In de koude en donkere maanden december en januari zijn de schermen namelijk slechts enkele uren per dag open geweest. In de maanden dat er meer natuurlijk zonlicht was en het warmer was waren de schermen verder geopend. In maart en oktober lagen de schermen het meest open. Gemiddeld over de hele proefperiode lagen het energie- en verduisteringsscherm 90 en 79% gesloten.



Figuur 29: Cyclisch gemiddelde stand van het energiescherm per maand. In de koudste maanden is het meest geschermd. In december is het energiescherm zelfs nagenoeg dicht gebleven om zo veel mogelijk te isoleren.



Figuur 30: Cyclisch gemiddelde stand van het verduisteringsscherm per maand. Hoewel het energiescherm in december bijna volledig gesloten bleef, is het verduisteringsscherm op de uren met het meeste zonlicht toch open geweest. Hierdoor kon zonnestraling de kas nog binnenkomen.

4.6 Energiebalans kas

De energiebalans van de kas wordt opgemaakt uit verschillende in- en uitgaande energiestromen en is als volgt opgebouwd:

Ingaande energiestromen

- Zonnestraling
- Lampenergie (straling en warmte)
- Buiswarmte (groei- en onderbuis)

Uitgaande energiestromen

- Straling en geleiding via kasdek
- Verdamping
- Ventilatie

De inkomende straling (zonne- en lampstraling) kan worden berekend met de gemeten intensiteiten en de bekende energie-inhoud van de betreffende spectra. Met de omrekenfactoren zoals benoemd aan het begin van dit hoofdstuk kan de inkomende zonne-energie worden uitgedrukt in gasequivalenten. De ingaande lamp- en buisenergie zijn in de hoofdstukken 4.1 en 4.2 beschreven.

Energiebalans kas

Aan de hand van de getallen in voorgaande paragrafen kan de energiebalans van de kas voor een gemiddelde winterweek worden opgesteld. Omdat er in week twee een belangrijke verandering is gemaakt, wordt de energiebalans voor en na die periode opgemaakt. Tabel 14 laat het totale energieplaatje van de kas voor- en na dit moment zien, met gemiddelde waarden van week 47 tot en met 1 en week 3 tot en met 7. Hieruit wordt duidelijk:

- De kaslucht was iets warmer in de periode tussen week 3 en 7. Wel was het iets minder koud buiten. Het temperatuurverschil tussen binnen en buiten was 14,7 en 14,8 °C in de weken 47 – 1 en 3 – 7.
- In beide periodes is de totale energie-input vergelijkbaar (1,4 en 1,5 m³/m²/week). Er kwam in de periode van week 3 – 7 iets meer energie de kas in vanuit een toename in zonlicht. In week 3 - 7 waren de uitgaande energiestromen echter ook (iets) groter dan in week 47 – 1.
- In week 3 – 7 kwam er meer zonne- en lampenergie de kas binnen dan in week 47 – 1. Omdat de totale inkomende energie gelijk was tussen de periodes, werd er in week 3 – 7 minder aardgas verbruikt.
- In de uitgaande energiestromen was er in week 3 – 7 meer energieverlies via het kasdek en vanuit de verdamping. Ook heeft het Air & Energy-systeem iets meer energie moeten steken in het opwarmen van de binnenkomende lucht, alhoewel dit nagenoeg verwaarloosbaar was.
- De verhouding tussen binnenkomende stralingsenergie (zonne- en lampstraling) en de energie voor verdamping was hoger in week 47 – 1 (0,90 in week 47 – 1 en 0,78 in week 3 - 7). Dit betekent dat er in die periode relatief meer verdamping per mol licht plaatsvond. Er is in week 3 – 7 dus relatief gezien meer energie overgebleven om bij te dragen aan het opwarmen van de kas.

Tabel 14: Energiebalans van de kas in gasequivalenten voor de periodes van week 47 – 1 en week 3 – 7. In de tweede periode was er relatief gezien weinig energie nodig voor verdamping ten opzichte van de inkomende straling. Ook was er minder buiswarmte nodig om de kas op temperatuur te houden, bij een groter temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

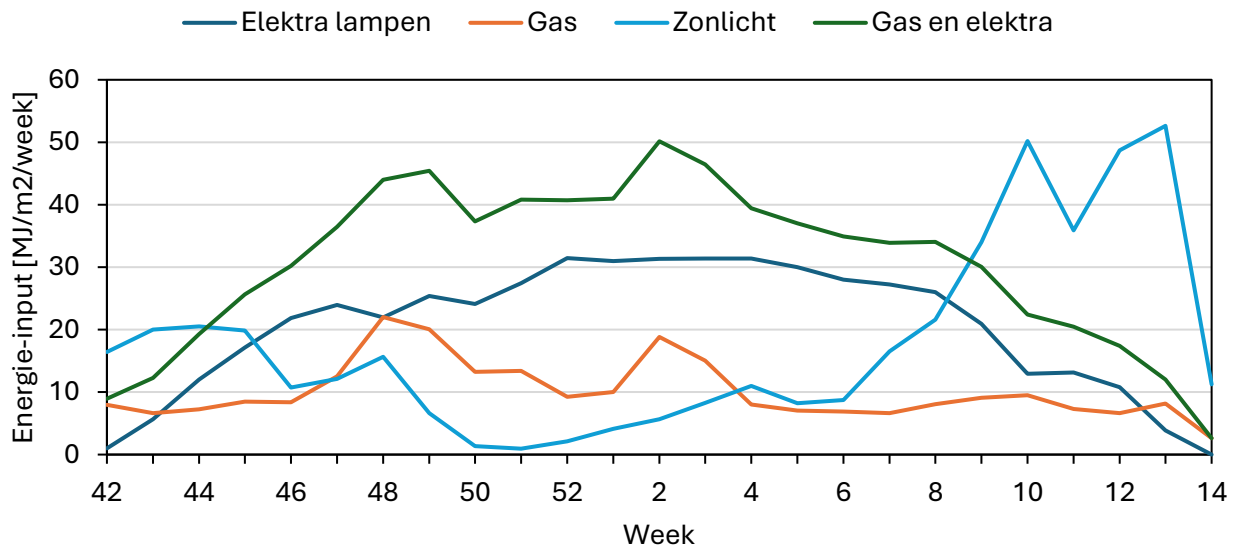
Week 47 – 1		Week 3 – 7	
21,0 °C Etmaaltemperatuur		21,6 °C Etmaaltemperatuur	
6,3 °C Buitentemperatuur		6,8 °C Buitentemperatuur	
$\Delta T = 14,7\text{ °C}$		$\Delta T = 14,8\text{ °C}$	
Inkomend	Uitgaand	Inkomend	Uitgaand
Zonlicht 2 mol/m ² /d: 0,2 m ³ /m ² /week	Kasdek ¹ : 0,44 m ³ /m ² /week	Zonlicht 3 mol/m ² /d: 0,3 m ³ /m ² /week	Kasdek ¹ : 0,49 m ³ /m ² /week
Lampenergie 13 mol/m ² /d: 0,8 m ³ /m ² /week	Verdamping ² : 0,72 m ³ /m ² /week	Lampenergie 15 mol/m ² /d: 0,9 m ³ /m ² /week	Verdamping ² : 0,73 m ³ /m ² /week
Buiswarmte: 0,4 m ³ /m ² /week	Air & Energy: 0,03 + 0,08 m ³ /m ² /week	Buiswarmte: 0,3 m ³ /m ² /week	Air & Energy: 0,03 + 0,07 m ³ /m ² /week
Totaal:	Totaal:	Totaal:	Totaal:
1,4 m ³ /m ² /week	1,2 m ³ /m ² /week	1,5 m ³ /m ² /week	1,3 m ³ /m ² /week

¹ gebaseerd op u-waarden Fjo de Ridder.

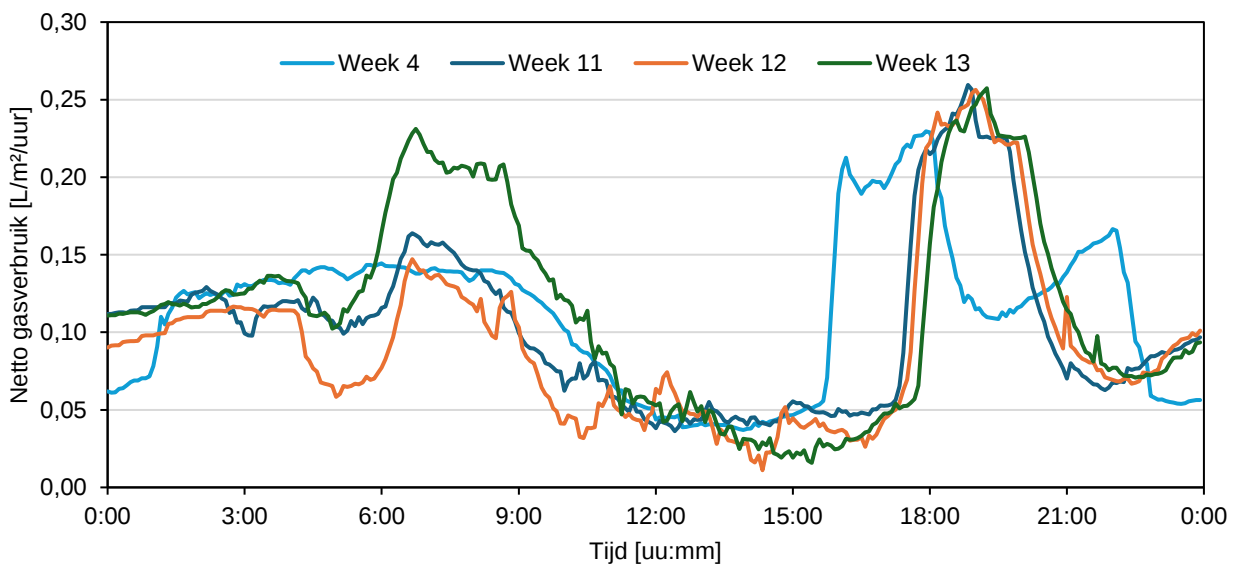
² gebaseerd op de verdamping uit de weeggoot

Totale energietoevoer

Aan het einde van de proef was er nog vraag naar buiswarmte terwijl er al veel zonne-energie beschikbaar was (Figuur 31): de energie voor buiswarmte blijft vanaf week 4 ongeveer gelijk terwijl de zonne-energie harder toeneemt dan de elektra in belichting afneemt. Figuur 32 geeft het cyclisch gemiddelde gasverbruik voor de laatste proefweken weer ten opzichte van die van week 4. Er is in die weken doorgaans meer buiswarmte gebruikt tussen 6:00 en 10:30 en vanaf 18:00. Het buisgebruik van 18:00 - 21:00 is een bewuste keuze geweest om de vruchttemperatuur wat hoger te krijgen (minimum buis). Dit verbruik lag ongeveer op 0,05 m³/m² per week en was 'slechts' ruwweg 25% van het totaalverbruik van ~0,2 m³/m²/week in die periode. Dit roept de vraag op of in de laatste weken niet meer buiswarmte bespaard kon worden. In de laatste proefweken werd namelijk ook meer gelucht dan in de voorgaande maanden. Het probleem zit dus in de momenten van 'tekort' en 'overmaat' aan energie. Het tekort wordt opgevuld door buiswarmte, het overschot wordt afgelucht. Toch is het interessant om te kijken naar mogelijkheden om overdag de temperatuur verder op te laten lopen dan gewoonlijk en op andere momenten lager dan gewoonlijk. Het potentiële vochtprobleem wat dan kan ontstaan wordt namelijk verholpen door het Air & Energy-systeem. Te zien is dat in week 13 iets meer verbruikt is in de ochtend, terwijl er in die uren echter ook gelucht is in maart (Figuur 24).



Figuur 31: Energie-input op weekbasis uit gas en elektra en zonlicht. Opvallend is dat de buiswarmte vanaf week 4 ongeveer gelijk blijft terwijl de zonne-energie harder toeneemt dan de elektra in belichting afneemt.



Figuur 32: Het cyclisch gemiddelde (netto-)gasverbruik in de laatste drie proefweken en in week 4. Er is een verhoogde vraag naar buiswarmte tussen 6:00 en 10:30 (en na 18:00, wat een bewuste keuze was om de vruchttemperatuur te verhogen). Ten opzichte van week 4 is er overdag nog relatief veel buiswarmte ingezet. Het cyclisch gemiddelde is het gemiddelde 5-minutenpunt op een gegeven tijdstip voor alle dagen in die week.

4.7 Teelt in kengetallen en energiekosten per kilogram komkommer

4.7.1 Teelt in kengetallen

Tabel 15 beschrijft de hele teelt in een aantal belangrijke getallen. De grootste vooruitgang werd gemaakt door een meerproductie van 43% te halen voor een toename in energiekosten van 12%. Ook is de relatieve verdamping ten opzichte van vorig jaar sterk verminderd. Het is gelukt om ruim onder de 100 mL/mol PAR te blijven, waarmee de lampwarmte heeft bij kunnen dragen aan de opwarming van de kas. Wel bleef de lichtbenuttingsefficiëntie op een gelijk niveau met het vorige jaar, en lag deze onder de verwachting. Door het drogestofpercentage van de vruchten te verlagen zou er theoretisch een hogere lichtbenuttingsefficiëntie behaald kunnen worden, en zou een hogere energie-efficiëntie behaald kunnen worden. Voor de praktijk is dit ook wenselijk, omdat een hoger drogestofpercentage van de vruchten zich niet direct vertaalt naar betere prijzen.

Tabel 15: De teelt in kengetallen vergeleken met de proef in de winter van 2022 - 2023

Parameter	Eenheid	2022 – 2023	2023 - 2024	%
<i>Start proef</i>	dd-mm-yyyy	13-10-2022	16-10-2023	-
<i>Einde proef</i>	dd-mm-yyyy	31-3-2023	01-04-2024	-
<i>Teeltduur</i>	Dagen / Weken	169 / 24,1	169 / 24,1	100
<i>Plantdichtheid</i>	pl./m ²	1,7	2,1	124
<i>Totaalproductie</i>	kg/m ²	33,7	48,8	145
<i>PAR-som</i>	mol/m ²	1914	2711	142
<i>Zonlicht</i>	mol/m ²	787	884	112
<i>LED-belichting</i>	mol/m ²	1127	1827	162
<i>Gemiddelde lichtsom</i>	mol/m ² /d	11,3	16,0	142
<i>Lichtbenuttingsefficiëntie</i>	g/mol PAR	17,8	18,0	101
<i>Gasverbruik</i>	m ³ /m ²	10	7,2	72
<i>Elektraverbruik belichting</i>	kWh/m ²	95	151	159
<i>Elektraverbruik Air & Energy</i>	kWh/m ²	5	3	67
<i>Energie-input</i>	m ³ /m ² gaseq.	20,2	22,9	113
<i>Relatieve verdamping</i>	mL/mol PAR	120	86	72%
<i>Week 47 – 1</i>	mL/mol PAR	-	98	-
<i>Week 3 - 7</i>	mL/mol PAR	-	86	-

Tabel 16 geeft de energiekosten in gasequivalenten per kg komkommer weer. Ten opzichte van de proef in de winter van 2022 – 2023 is er 22% minder energie benodigd geweest. Hoewel dit al een flinke verbetering is, liggen er nog kansen om nog efficiënter met de energie om te gaan. De lichtbenuttingsefficiëntie was namelijk ten opzichte van de voorgaande proef niet verbeterd. Hierin ligt nog potentie om de productie te verhogen door het drogestofpercentage van de vruchten te verlagen.

Tabel 16: De energiekosten per kilogram komkommers in de proef van 2022 - 2023 en 2023 - 2024. Ten opzichte van het eerdere seizoen is er een reductie van 22% aan energie gerealiseerd. Door het hoge drogestofpercentage van de vruchten te verlagen zou in theorie een nog hogere energie-efficiëntie behaald kunnen worden.

	2022 - 2023	2023 - 2024	%
<i>Stuks (Aantal/m²)</i>	93	132,5	142
<i>Gewicht (Kg/m²)</i>	33,7	48,8	145
<i>Elektraverbruik (kWh/m²)</i>	95	151	159
<i>Elektra in aardgaseq. (m³/m²)</i>	9,7	15,4	159
<i>Gasverbruik (m³/m²)</i>	10	7,2	72
<i>Kosten Elektra (kWh/kg)</i>	2,8	3,1	111
<i>Kosten gas (m³/kg)</i>	0,3	0,1	33
Energiekosten in m³/kg komkommer	0,60	0,47	78

5. Leerpunten en conclusies

Het doel van deze proef was om, net als tijdens de winterteelt van 2022 – 2023, een teeltstrategie te optimaliseren voor de hoge draad komkommerteelt in de winter, met een energiereductie van > 50% ten opzichte van de praktijk. Hierbij werd gestreefd naar een grotere energiebesparing per kg komkommer ten opzichte van de winterteelt van 2022 – 2023, door de energie-input op een andere manier te verdelen (meer energie voor belichting en minder gas voor warmte).

Door de grote isolatiewaarde van de kas door het vele schermen met zowel het energiescherm als het verduisteringsscherm is niet uitstraling, maar verdamping de grootste verliespost aan warmte. Daarom is het van belang om te sturen op verdamping: als de lampen relatief meer energie gebruiken dan dat de verdamping stijgt, draagt de lampwarmte effectief bij aan de opwarming van de kas. Dit is noodzakelijk om de energiedoelstellingen van deze proef te kunnen realiseren. Voor een energiebesparende teelt zijn de volgende drie stappen gevolgd:

- Energiebesparing door kasisolatie
- Actieve ontvochtiging met warmte-terugwinning
- Verlaging van de hoeveelheid verdamping in gram/mol PAR

De proef kende twee hoofddoelstellingen:

- Verhogen van de energiebesparing per kg komkommer (energie-efficiëntie verhogen ten opzichte van de winterteelt van 2022 – 2023) met 140 kWh/m² elektra en 6 m³/m² gas.
- Gericht sturen op verdamping, waarbij gestreefd wordt naar een verdamping van < 100 mL/mol PAR, zodat de lampwarmte aanzienlijk kan bijdragen aan het verwarmen van de kas.

In deze teelt is de energie-efficiëntie hoger dan in voorgaande proef (22% in m³/kg komkommers). Het is gelukt om de relatieve verdamping te verlagen tot onder de 100 mL/m²/mol PAR, waardoor de restwarmte van de lampen de kas heeft verwarmd: Als de verdamping op 120 mL/mol was blijven steken (zoals in seizoen 2022 - 2023) dan is er energetisch gezien geen netto voordeel van extra belichting ten opzichte van de extra verdamping. Hierdoor was er ongeveer 3 – 4 m³/m² minder buiswarmte nodig om de kas op temperatuur te houden. Mogelijk kan er nog efficiënter met energie worden omgegaan door nog verder te schuiven in de verhouding tussen buiswarmte en lampenergie.

Ook konden de (energie)verliezen naar buiten toe worden beperkt door minder te luchten via de ramen. Door het Air & Energy-systeem voor de ontvochtiging te gebruiken kon energie bespaard worden. Een belangrijk leerpunt voor het gebruiken van dit systeem was dat door verlaging van het maximale debiet de relatieve verdamping verlaagd kon worden en de invoer van koude buitenlucht meer beperkt. Hierdoor werd er meer energie bespaard.

Om de energie-efficiëntie nog verder te verhogen, liggen er kansen in een toename van de lichtbenuttingsefficiëntie. Omdat het drogestofpercentage van de vruchten onveranderd is ten opzichte van de proef in 2022 – 2023 ligt het voor de hand om hier een verbeterslag in te maken. Het grootste aandachtspunt lijkt de vruchtaanleg te zijn. Het aantal vruchten dat toegelaten wordt om uit te groeien moet hoog genoeg zijn om de hogere lichtbenuttingsefficiëntie te realiseren. Niet alleen zou hierdoor de energie-efficiëntie toenemen, ook ligt er potentie voor een toename in productie.

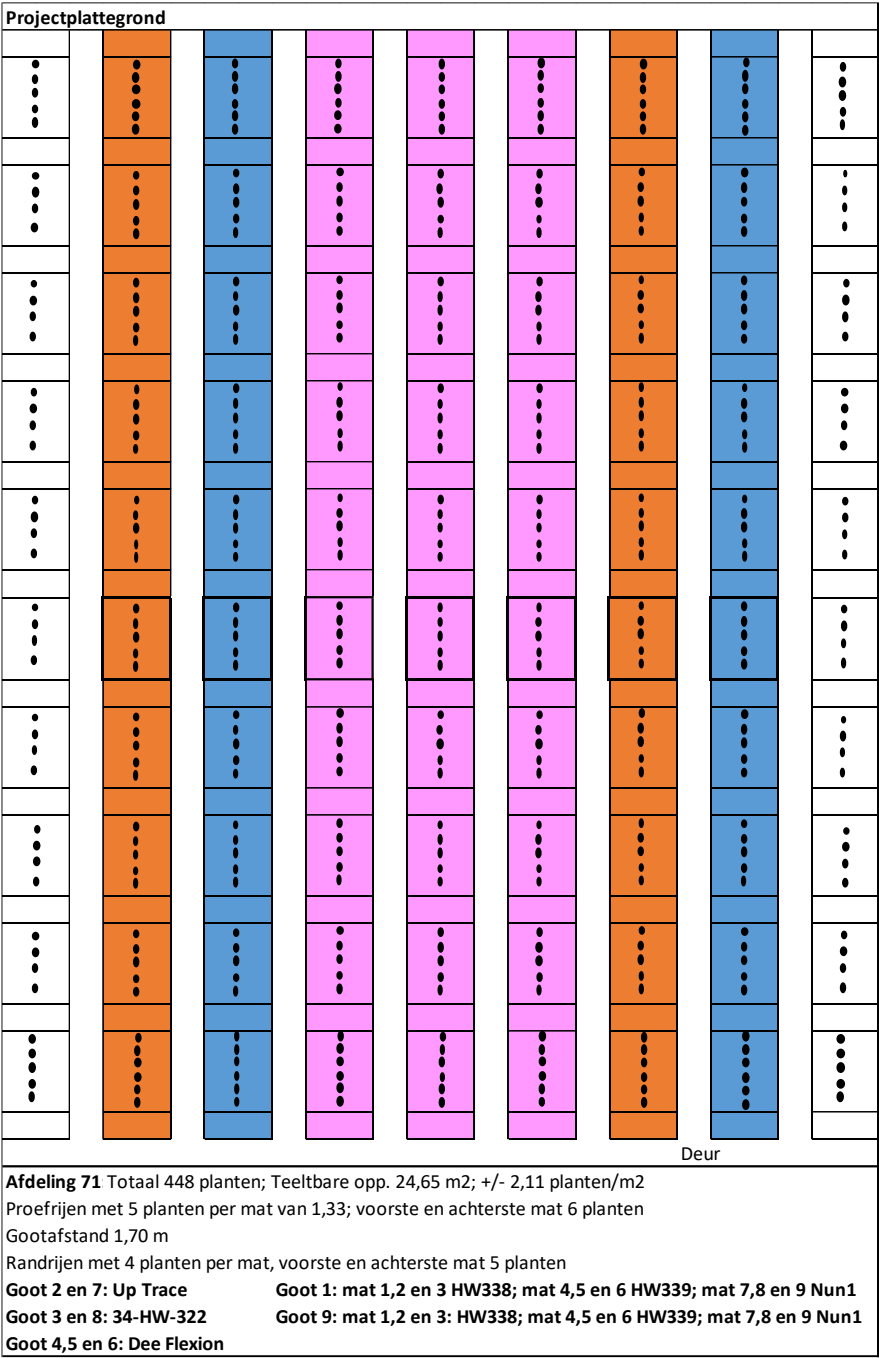
5.1 Puntsgewijze conclusies:

- Ten opzichte van de vorige winterteelt is er een forse toename in productie gerealiseerd, voor een geringe toename in energiekosten.
- Er is efficiënter met energie omgegaan door meer te belichten en minder gas te verbruiken. Ook is er energie bespaard door dynamisch te belichten.
- De lampwarmte heeft tijdens deze teelt bijgedragen aan het opwarmen van de kas, aangezien de relatieve verdamping onder de 100 mL/mol is gebleven, terwijl lampen energie gaven voor 120 mL/mol PAR (bij een efficiëntie van 3.4 $\mu\text{mol/J}$). Hierdoor is het mogelijk geweest een verdere besparing op gas door te voeren ten opzichte van voorgaande winterteelt. Er is actief gestuurd op de verdamping met behulp van het Air & Energy-systeem door middel van sturing op de VD en het totaal benodigde debiet.
- Hoewel de productie tijdens deze winterteelt zo'n 43% hoger lag ten opzichte van de winterteelt van 2022 – 2023, was de lichtbenuttingsefficiëntie over de productieweken onveranderd. Deze laag blijvende lichtbenuttingsefficiëntie gedurende beide teelten heeft wellicht te maken met het hoge drogestof gehalte van de vruchten: deze lag in de teelt van 2022 – 2023 op gemiddeld 3,4% en afgelopen teelt was dit ook zo. Als dit percentage terug kan worden gebracht naar 2,8% levert dit een productiewinst op van 21%. Het grootste aandachtspunt lijkt de vruchtaanleg te zijn. Het aantal vruchten dat toegelaten wordt om uit te groeien moet hoog genoeg zijn om de hogere lichtbenuttingsefficiëntie te realiseren. Zo hadden om de geprognostiseerde LBE te behalen er 15% meer vruchten moeten uitgroeien dan is gebeurd.
- De assimilatenbalans heeft aangetoond dat gedurende een groot deel van teelt de aanmaak van assimilaten hoger lag dan het verbruik. Dit geeft aan dat waarschijnlijk met een hogere plantbelasting geteeld had kunnen worden, wat mogelijk ook een verlagend effect zou kunnen hebben op het drogestof-gehalte van de vruchten.

Referenties

- Heuvelink, E. (2005). Tomatoes. (Crop production science and horticulture; No. 13). CAB International.
- Hogewoning SW, Trouwborst G. Pot CS, 2012. Efficiënter lichtspectrum voor open gewassen: Focus op productie en vervolgteelt van uitgangsmateriaal. Plant Lighting, Utrecht. 39p.
- Farquhar GD, Caemmerer SV, Berry JA, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C-3 species. Planta 149, 78–90.
- Kozuka T, Suetsugu N, Wada M, Nagatani A, 2013. Antagonistic Regulation of Leaf Flattening by Phytochrome B and Phototropin in *Arabidopsis thaliana*. Plant & Cell Physiology 54:1, p69-79.
- Marcelis LFM, 1994. Fruit growth and dry matter partitioning in cucumber, Wageningen, 173p.
- Monsi M, Saeki T, 2005. On the factor light in plant communities and its importance for matter production. Ann. Bot. 95, 549–567.
- Nawrocki KR, 1985. Meting warmteoverdrachtscoefficient voor convectie van verwarmingspijpen in kassen. Wageningen, 31p.
- Rappoldt C, Schapendonk AHCM, 2012 LED belichting en het Nieuwe Telen; Scenario analyses tomaat. EcoCurves rapport 15, EcoCurves, Haren en Plant-Dynamics, Wageningen. 58p.
- Trouwborst G, Oosterkamp J, Hogewoning SW., Harbinson J., van Ieperen, W. (2010). The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. Physiol. Plant. 138, 289–300.

Bijlage I: Plattegrond



Figuur I.1: Kasplattegrond

Bijlage II: Lichtspectrum en lichtverdeling

- Methode:
 - 8 paden, 1 meetpunt per 1.7 m
 - Twee meethoogtes: 150/200 cm vanaf de lamp
 - De plattegronden zijn gespiegeld weergegeven

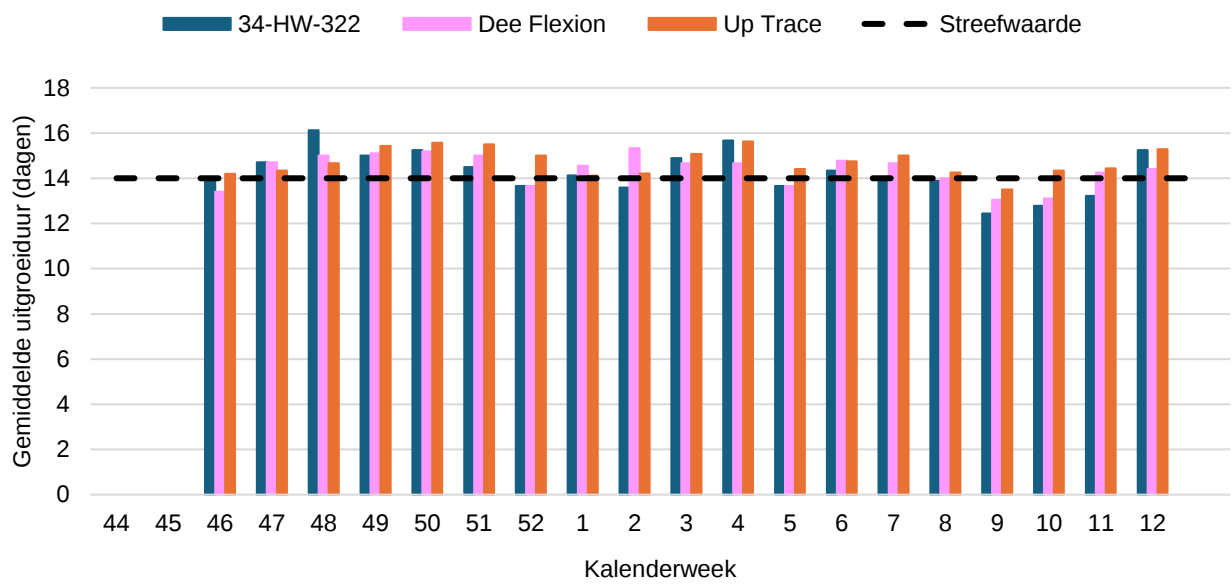
De lichtverdeling tussen de verschillende rijen fluctueerde flink (Figuur II.1). De rijen van het hoofdtras Dee Flexion hadden een intensiteit van gemiddeld zo'n 235 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Gemiddeld hadden de overige rijen een hogere intensiteit PAR. 200 cm onder de lampen was de verdeling beter, maar bleef de variatie tussen rijen in stand.

hoogte	betonpad							
150cm va LAMP	pad							
matrand	1 (links)	2	3	4	5	6	7	8
vooraan	1	2	3	4	5	6	7	8
	361	373	353	363	240	255	372	322
	281	289	237	232	266	215	208	309
	351	423	165	200	364	193	139	153
	373	214	273	254	136	220	319	320
	228	169	312	297	150	225	283	244
	466	383	168	205	353	208	139	197
	270	291	195	207	205	203	246	397
	176	167	359	318	124	235	374	236
	426	289	195	210	238	197	184	405
	427	413	164	196	309	204	172	253
achteraan	11	10	9	8	7	6	5	4
padgem	337.3	292.0	248.2	250.2	229.1	216.6	256.8	295.5
Gemiddelde		265.7		236		Gem minus rand		239.5
SD		85.2		64				74.1
COV		0.32		0.27				0.31
min/max		0.266		0.341				0.293

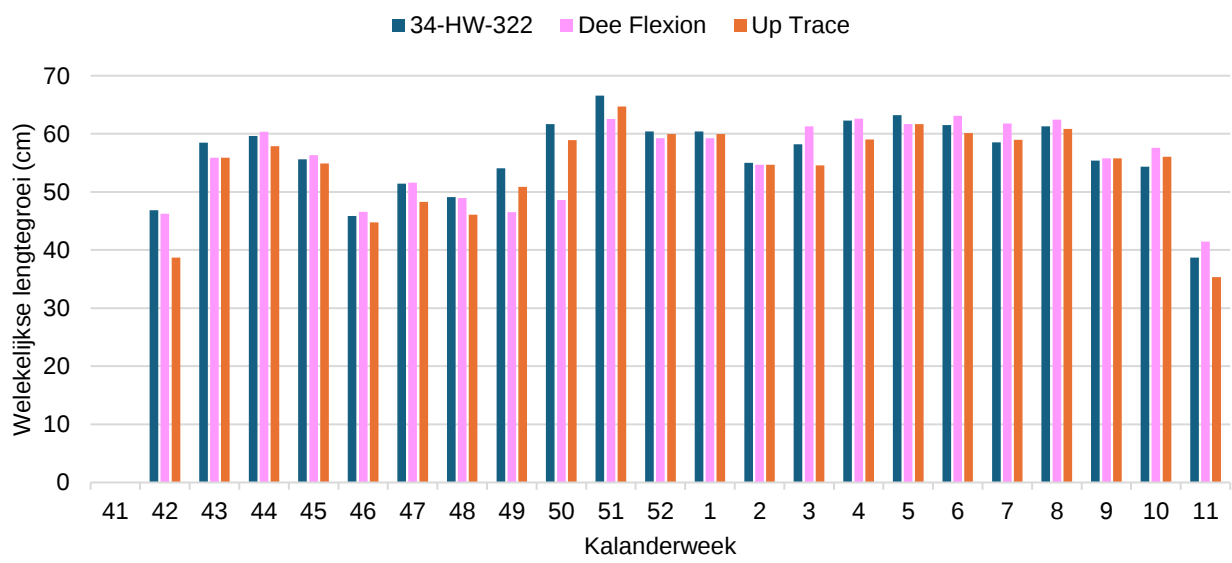
hoogte	betonpad							
200cm va LAMP	pad							
matrand	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8
	303	305	297	279	300	157	255	248
	265	242	221	235	278	239	214	248
	255	328	239	180	304	244	179	182
	314	244	258	253	202	211	262	289
	240	219	268	284	212	206	254	262
	333	317	225	203	285	229	181	209
	260	284	232	225	233	212	229	273
	187	189	278	295	170	189	294	263
	369	284	244	222	245	216	187	287
	366	345	232	201	276	248	200	262
	340	252	259	273	194	209	298	343
padgem	293.8	273.5	250.3	240.9	245.4	214.5	232.1	260.5
Gemiddelde		251.4		238		Gem minus rand		239.7
SD		46.6		36				40.1
COV		0.19		0.15				0.17
min/max		0.425		0.516				0.493

Figuur II.1: De lichtverdeling op 150 en 200 cm onder de lampen. In de rijen van het hoofdtras was de gemiddelde lichtintensiteit in PAR lager dan andere rijen.

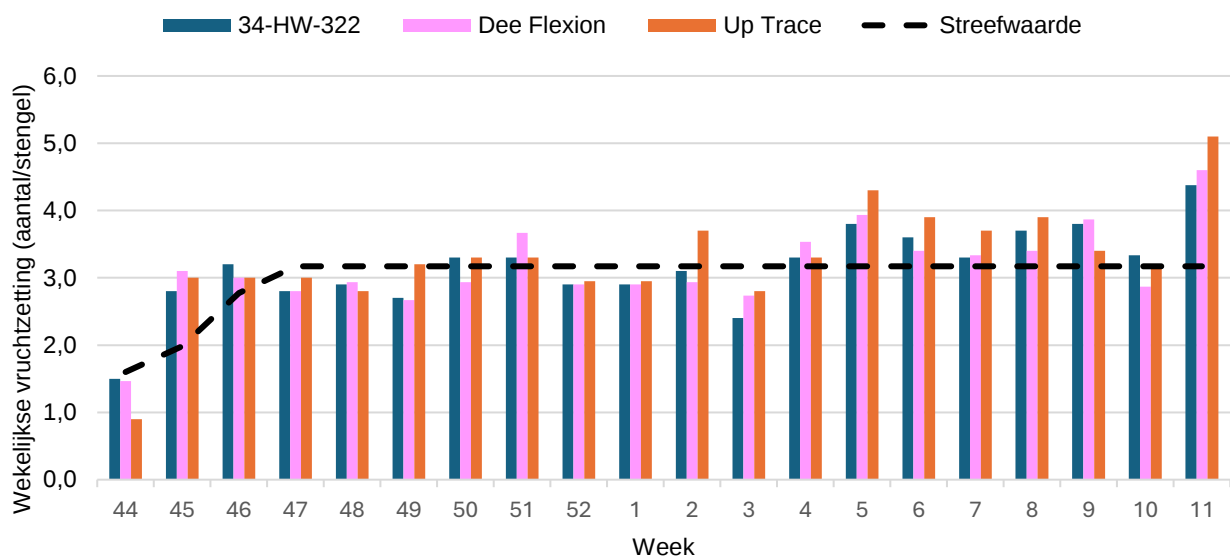
Bijlage III: Wekelijkse plantmetingen



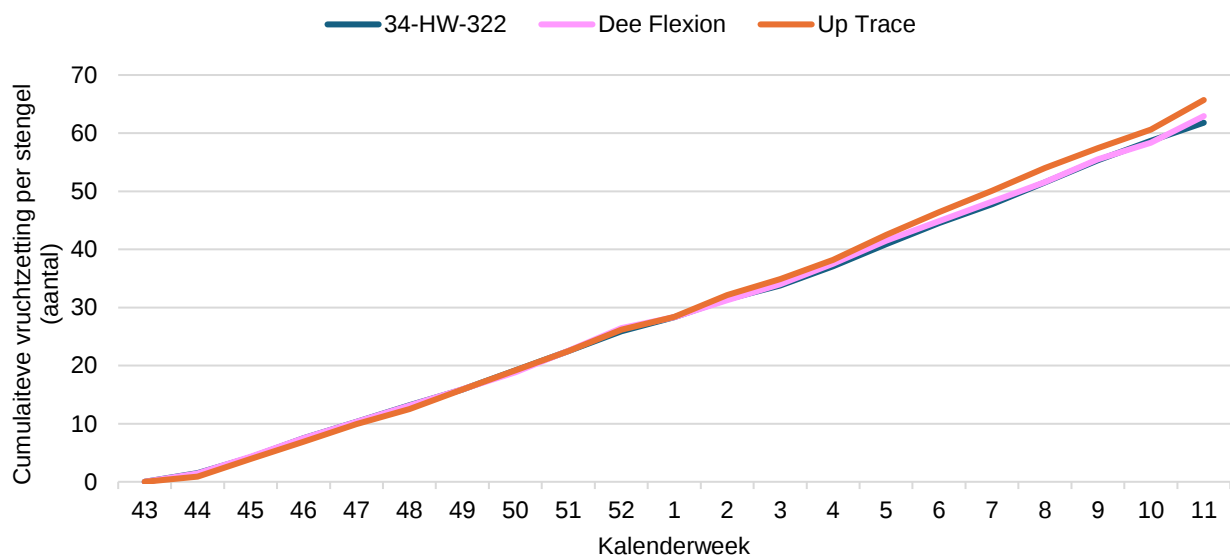
Figuur III.1: Uitgroeiduur



Figuur III.2: Wekelijkse lengtegroei in centimeters

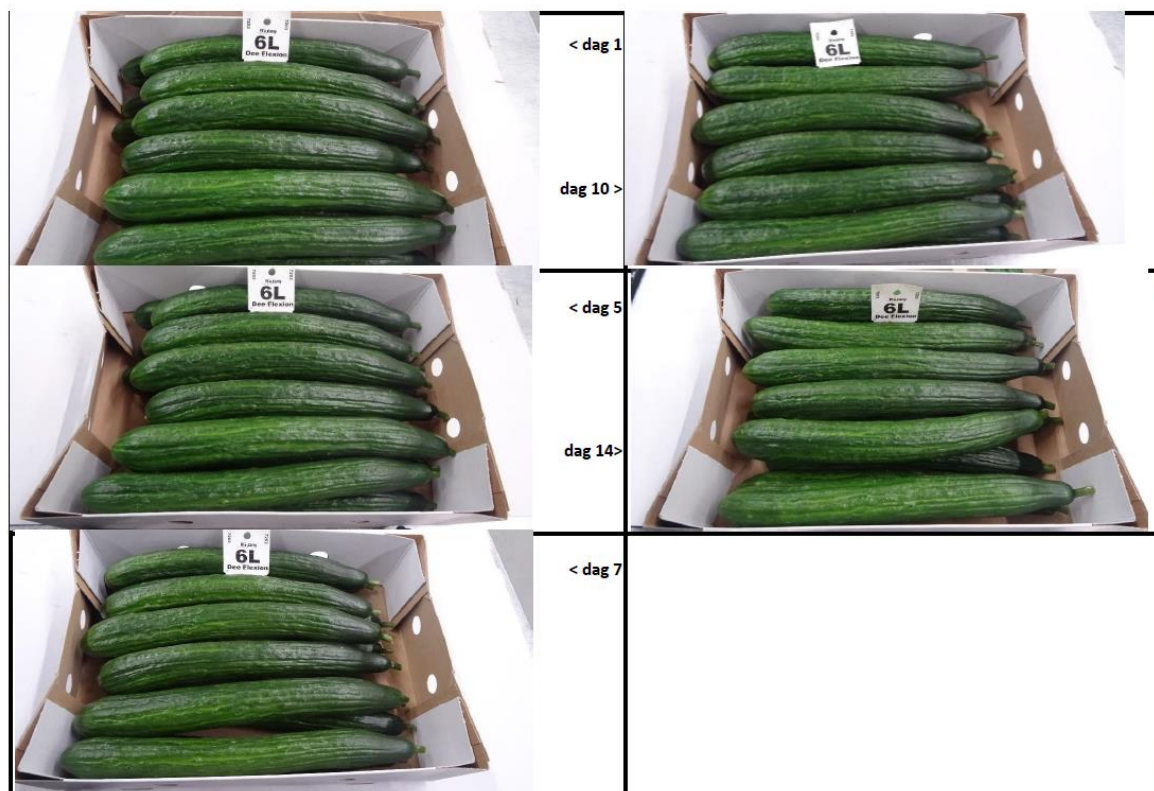


Figuur III.3: *Wekelijkse vruchtzetting per stengel. De gestreepte zwarte lijn geeft de vruchtzetting weer die nodig was voor het realiseren van de geprognoseerde productie.*

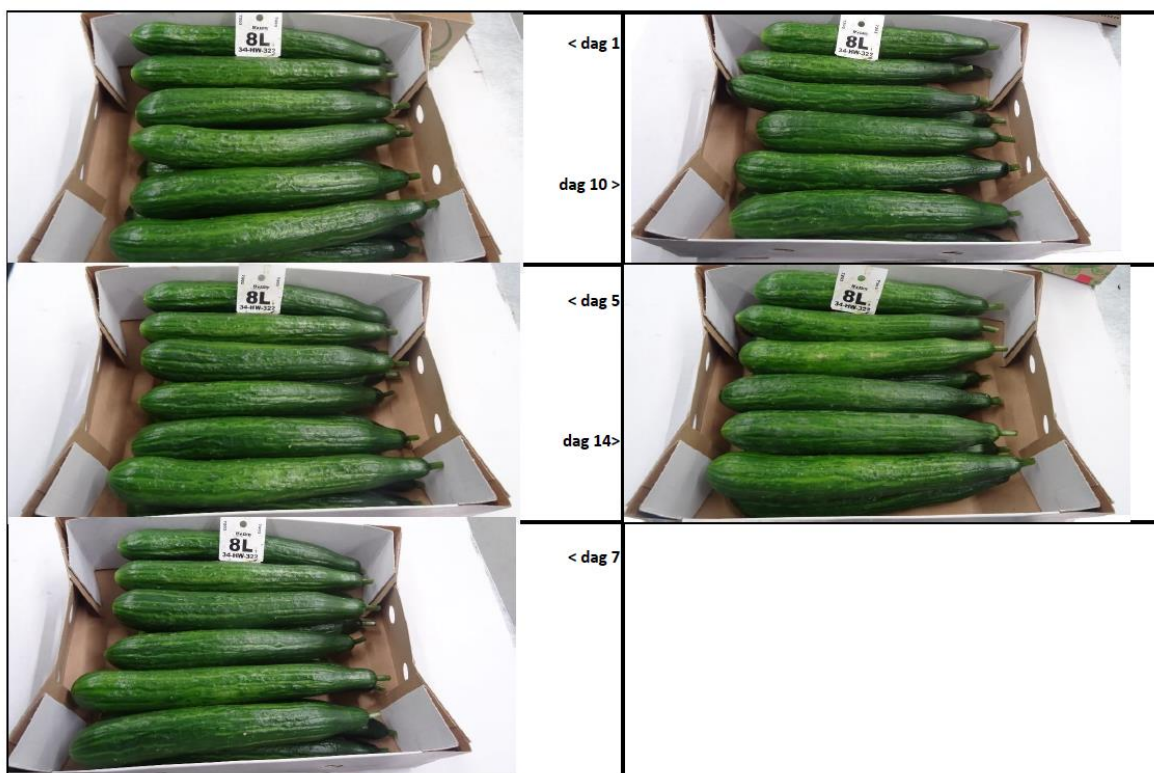


Figuur III.4: *Cumulatieve vruchtzetting per stengel*

Bijlage IV: Foto's houdbaarheid



Figuur IV.1: Foto's houdbaarheid Dee Flexion op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in December



Figuur IV.2: Foto's houdbaarheid 34-HW-322 op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in December



Figuur IV.3: Foto's houdbaarheid Up Trace op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in December



Figuur IV.4: Foto's houdbaarheid Spaans product op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in December



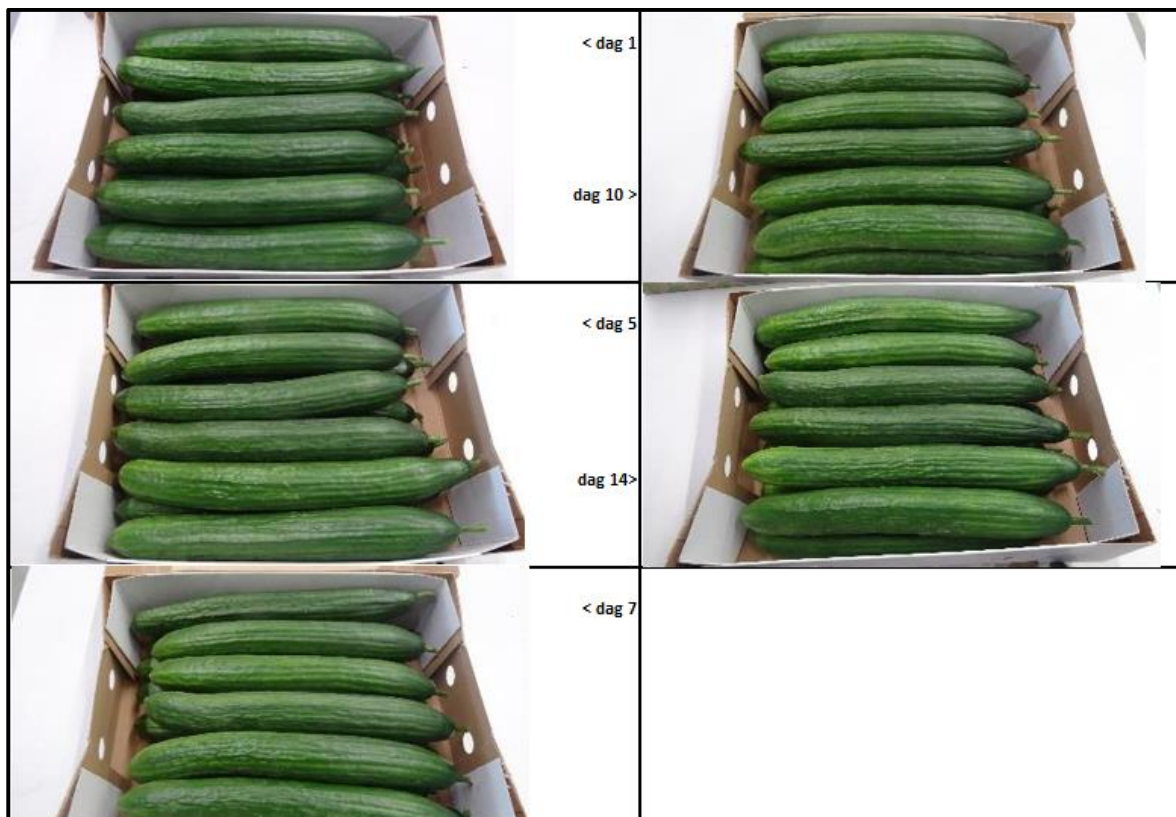
Figuur IV.5: Foto's houdbaarheid Dee Flexion op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in Maart



Figuur IV.6: Foto's houdbaarheid 34-HW-322 op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in Maart



Figuur IV.7: Foto's houdbaarheid Up Trace op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in Maart



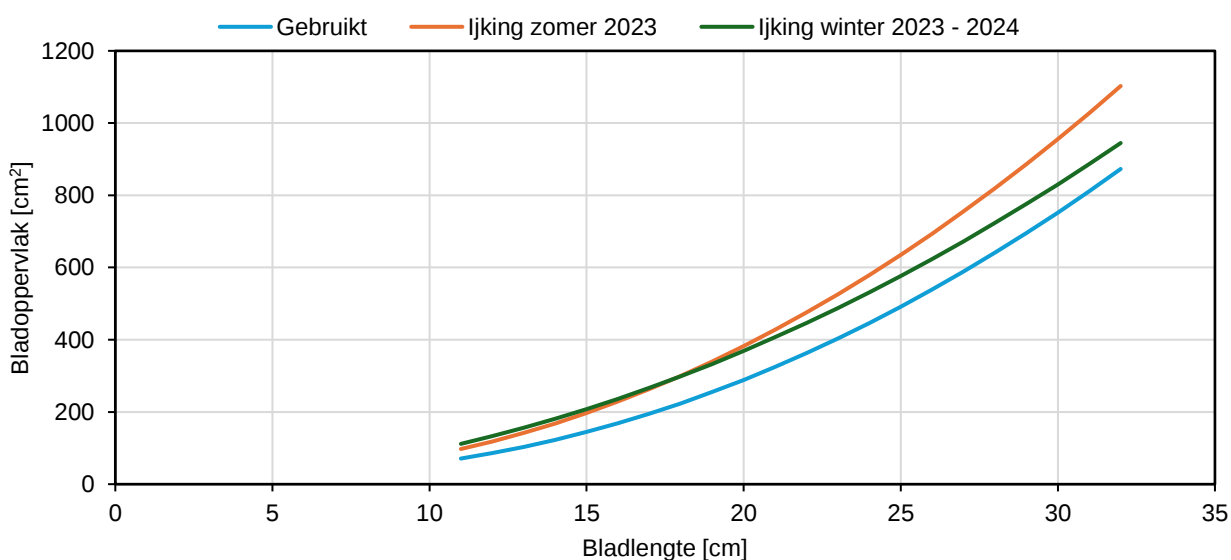
Figuur IV.8: Foto's houdbaarheid Nederlands product op dag 1, 5, 7, 10 en 14 dagen na oogst in Maart

Bijlage V: Controle van de gebruikte bladoppervlakteformule

Tot in de zomer van 2023 is het bladoppervlakte vanuit de bladlengte berekend met een log-formule. Om de formule voor het berekenen van de bladoppervlakte (de LAI) vanuit bladlengte te controleren is er op twee momenten een aantal bladeren bemonsterd. Van bladeren op verschillende hoogtes is de lengte en de oppervlakte bepaald. Hieruit is volgens een least-squares methode de parabolische formule geparameteriseerd. Tijdens de ijking werd ook een parabolische formule geparameteriseerd die overeenkwam met de log-formule ($R^2 = 1$). De parabolische formule vereenvoudigde de berekening van de log-formule.

Op beide ijkmomenten gaf de afgeleide LAI-formules een hoger bladoppervlakte dan de gebruikte formule. In de zomer van 2023 was er een overschatting van 30%, terwijl in februari 2024 een toenemende afwijking werd gevonden bij afnemende bladlengtes (gemiddeld 28% bij bladlengtes tussen 11 en 32 cm) (Figuur V.1).

Periode	Formule
Winter 2022 – 2023	$\text{Bladoppervlak} = 10^{-0.623 + 2.37 \log(\text{bladlengte})}$ $\text{Bladoppervlak} = \text{bladlengte} \times 1,17 - \text{bladlengte} \times 11,96 + 61,42$
Ijking zomer 2023	$\text{Bladoppervlak} = \text{bladlengte} \times 1,35 - \text{bladlengte} \times 10,18 + 46,13$
Ijking winter 2023 – 2024	$\text{Bladoppervlak} = \text{bladlengte} \times 0,92^2$

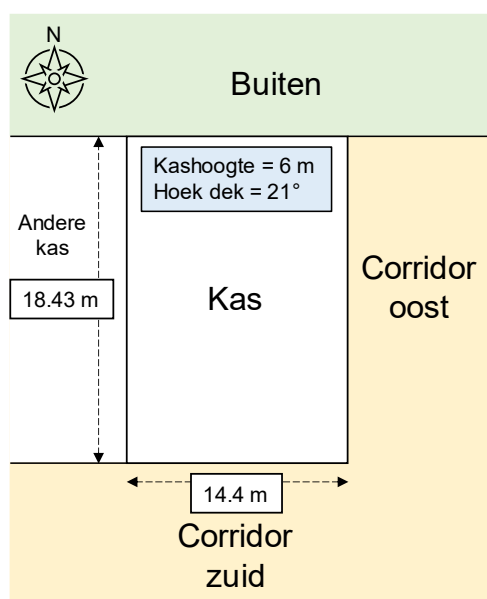


Figuur V.1: Verloop van bladoppervlakteformules om de bladlengte om te rekenen in bladoppervlakte. In de winter van 2023 - 2024 was het berekende bladoppervlakte bij toenemende bladlengte toenemend lager dan wanneer de formule van uit de zomer van 2023 werd gebruikt.

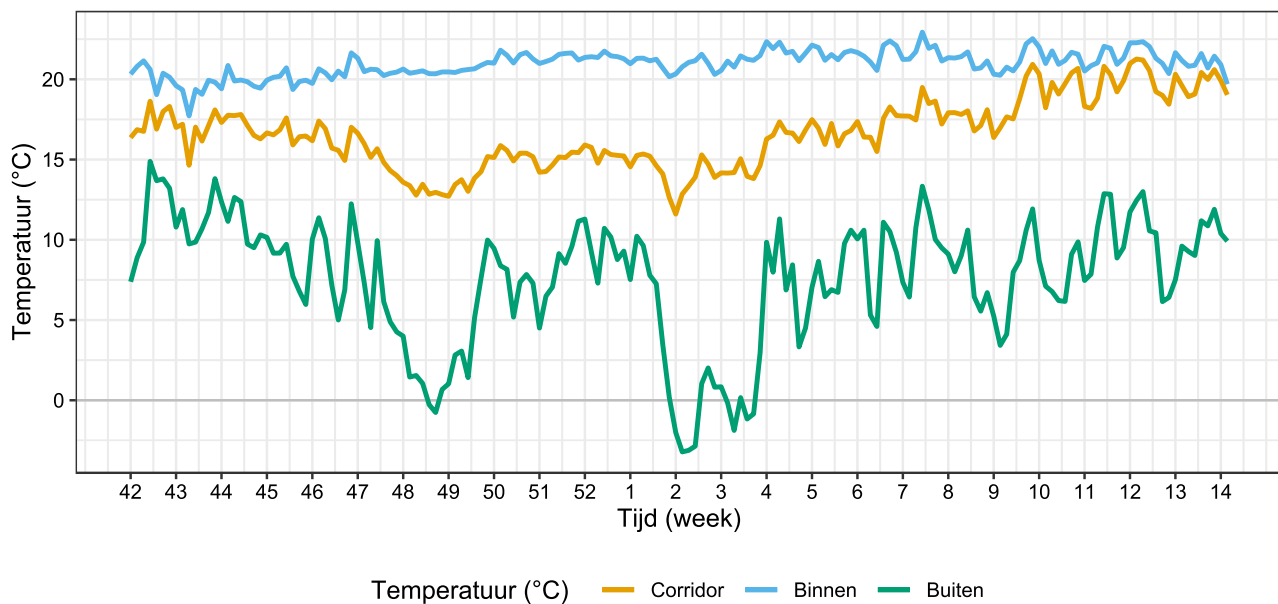
Bijlage VI: Correctie van energieverlies kasdek

De U-waarde van de kas vertegenwoordigt het energieverlies van de kas naar buiten toe (in $\text{W/m}^2/^\circ\text{C}$). Bij een hogere U-waarde of bij een groter temperatuurverschil tussen de kas en buiten zal dit energieverlies groter zijn. De U-waarde voor de hele kas is afhankelijk van het oppervlak van het dek en de gevels en is afhankelijk van de schermstanden. Deels komen deze uit een studie van Fjo de Ridder (Thomas More) en deels zijn deze ingeschat op basis van de gevelschermen die gebruikt zijn.

De energieverliezen via het kasdek en gevel zijn afhankelijk van deze U-waarden en de temperatuurverschillen tussen de kas en aanliggende ruimtes (aanliggende kas, corridor en kasdek). Figuur VI.1 geeft een schematische tekening van de huidige kas en de aanliggende ruimtes weer vanuit bovenaanzicht. Het temperatuurverschil met de buitenlucht is erg variabel, terwijl het temperatuurverschil met de corridor veel constanter is en duidelijk groter wordt in de winter (Figuur VI.2). Er is aangenomen dat de temperatuur in het andere kascompartiment ongeveer hetzelfde is als in de huidige kas en is dus niet meegenomen in de berekeningen. Daarnaast kan er met het sluiten van de dekschermen (energiedoek en lichtuitstootdoek) meer geïsoleerd worden en wordt de U-waarde lager. Doordat de schermen grotendeels gesloten zijn gebleven in de winter, is de U-waarde van het kasdek in de winter een stuk lager dan in de lente en herfst. Door deze veranderingen in temperatuurverschillen en U-waarden is het relatieve energieverlies in de lente en herfst het grootst door het kasdek, terwijl in de winter het aandeel energieverlies aan corridor flink stijgt (Figuur VI.3). In een praktijkkas zal dit anders zijn, doordat het aandeel van de oppervlakte van wanden ten opzichte van het kasdek veel kleiner is in een grotere kas. Hierdoor is een correctiefactor nodig om het energieverlies en gasverbruik van dit kleine kascompartiment te vertalen naar een grote kas.

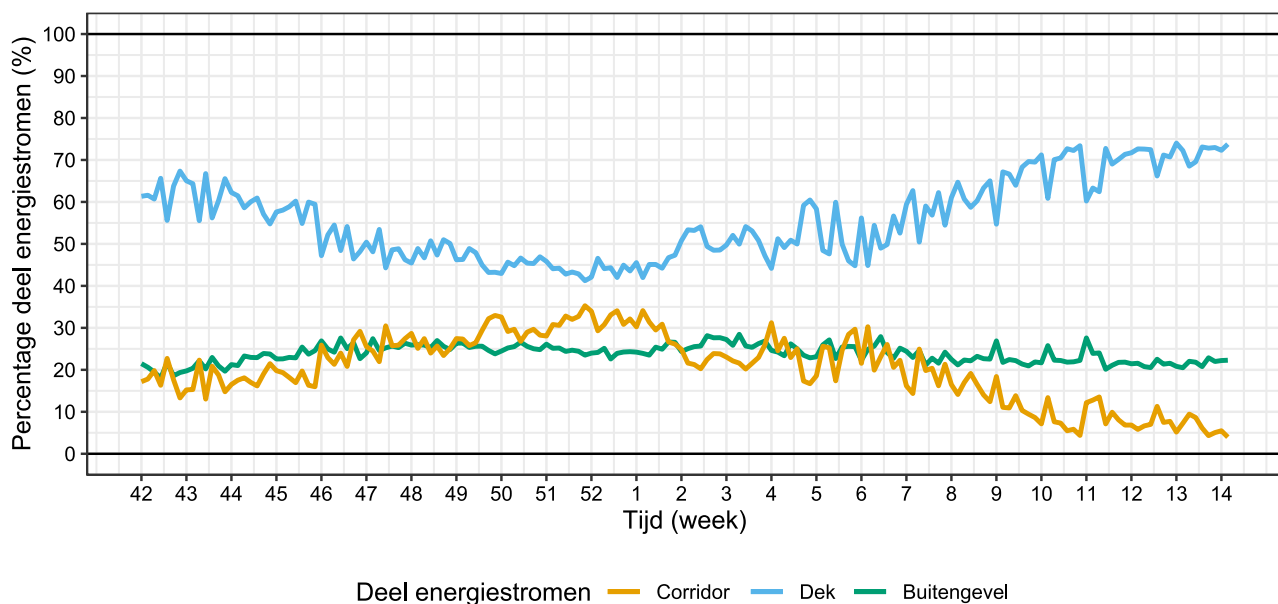


Figuur VI.1: Schematische tekening van de kas en de aanliggende ruimtes



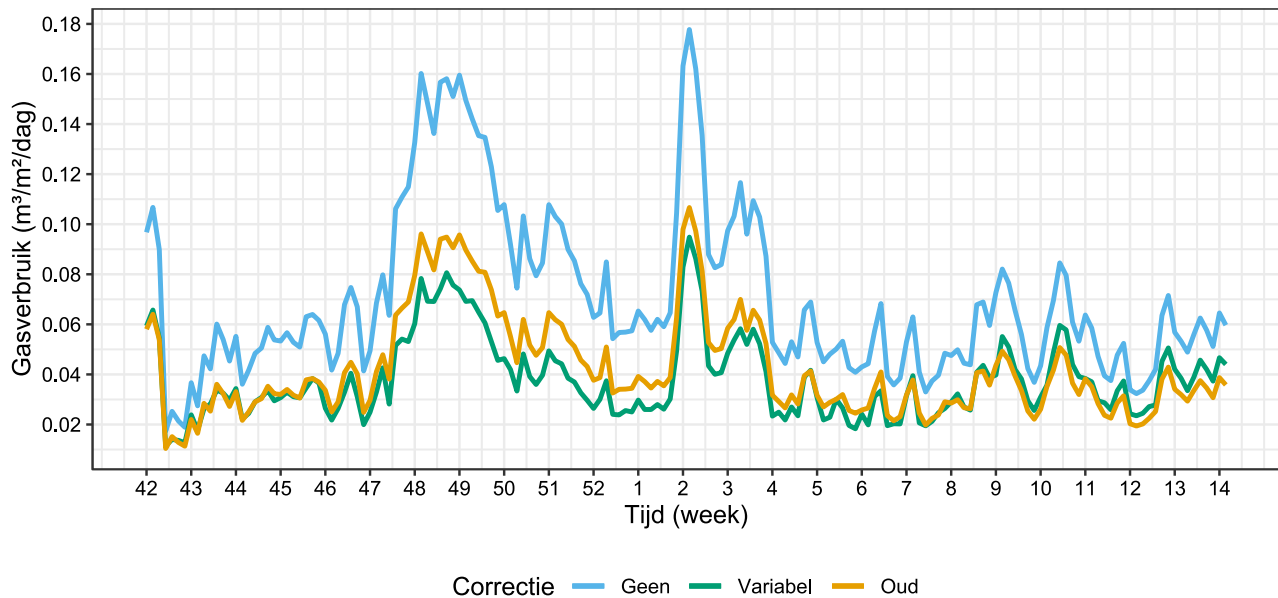
Figuur VI.2: Etmaaltemperatuur van binnen het kascompartiment, de corridor en buiten.

Door een simulatie uit te voeren met de aanname dat de kas enkel uit kasdek bestaat, kan een inschatting gemaakt worden van de energieverliezen in een (oneindig) grotere kas. Hiervoor wordt er met de temperatuurverschillen en de U-waarden berekend hoeveel energie er per dag door elk oppervlak verloren gaat (Figuur VI.3). Alleen het deel energie dat door het kasdek verloren gaat wordt in de simulatie meegenomen, waarbij dit percentage de correctiefactor wordt bij het vertalen van deze kas. Deze correctiefactor lijkt niet de vaste $0,6 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ te zijn waarmee is gerekend in hoofdstuk 4, maar variabel tussen $0,6$ en $0,7 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ in de lente en herfst en $0,45 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ in de winter.



Figuur V.3: Percentages van de energiestromen van binnen het kascompartiment, de corridor en buiten.

De nieuwe variabele correctiefactor zorgt ervoor dat het netto gasverbruik in de lente iets hoger en in de winter een stuk lager zou zijn (Figuur VI.4). In plaats van netto $7,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gas verbruikt, zou er in een oneindig grote kas slechts $6,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ gebruikt zijn (Tabel VI.1). De berekening zoals die in hoofdstuk 4 is toegepast valt hierdoor hoger uit dan in werkelijkheid.



Figuur VI.4: Bruto gasverbruik (geen correctie) en netto gasverbruik met de oude (0,6) en variabele correctie.

Tabel VI.1: Gecorrigeerd gasverbruik met de vaste en variabele correctie.

	Gasverbruik vaste correctie (m^3/m^2)	Gasverbruik variabele correctie (m^3/m^2)
Week 42-1	3,96	3,26
Week 2-14	3,24	3,20
Totaal	7,20	6,47

Bijlage VII: Aanzet vochtbalans plant

Op basis van de verzamelde gegevens over de verdamping en andere kengetallen, kan er een eenvoudige vochtbalans worden opgesteld. NB in onderstaand overzicht gaat het om de trend en niet om de exacte getallen zoals in deze proef gemeten.

Op basis van de tweede helft zijn de volgende getallen als uitgangspunt genomen:

- 18 mol/m² PAR met 18 uur daglengte
- 18 g/mol voor de vruchtoogst
- 85 g/mol verdamping
- Fractie generatief/vegetatief: 65/35
- 3% drogestof vruchten
- 10% drogestof in blad en stengel

Dit geeft op dagbasis de volgende getallen:

- Verdamping: 18 mol/m² x 85 g/mol = 1530 g/m²/d verdamping
- Vruchtgroei vers: 18 mol/m² x 18 g/mol = 324 g vers. Bij 3% drogestof is dit 314 g/m²/d water en 9,7 g/m²/d drogestof
- Bijgroei vegetatief: 9,7 / 0,65 x 0,35 = 5,2 g/m²/d drogestof → 47 g/m²/d water
- Wateropslag: 314 + 47 = 361 g/m²/d

Totaal geeft dit dus 1530 + 314 + 47 = 1891 g/m²/d opname aan vocht. De verdamping beslaat dus ongeveer 81% van de totale vochtstroom door de plant.

Voor tomaat is onderzocht dat meer dan 90% van het vruchtgewicht bestaat uit floëemwater (suikerwater) en slechts maximaal 10% uit xyleemwater (direct afkomstig uit de wortels; Ho et al. 1987). Aannemende dat deze regel ook geldt voor de bijgroei van blad en stengel dan gaat er maximaal 10% van 362 g/m² = 36 g/m²/d 'direct' naar de opslag en 326 g/m²/d indirect via de assimilatenstroom via het floëem.

Op celniveau in de bladeren vindt er waarschijnlijk een concurrentieslag plaats om water:

- Een trekkende onderdruk vanuit de omgeving om te verdampen (1530 g/m²/d)
- Een trekkende osmotische druk (potentiaal) om het floëem te vullen (326 g/m²/d)

De totale verdamping kan verdeeld worden in nachtverdamping en verdamping overdag. Gangbare metingen laten zo'n 20 – 40 g/m²/h zien. Dat zou dus in orde/grootte van 120 - 240 g/m²/d zijn. Dat betekent dat er 1290 - 1410 g/m² overdag zou verdampen. Dit is gemiddeld 72 - 78 g/m²/h.

De benodigde energie voor de verdamping in de nacht wordt gerealiseerd door convectie-energie: een lagere planttemperatuur dan de ruimtetemperatuur. Overdag geldt dit ook maar komt ook de straling erbij. De lampenergie van 1 mol LED-licht is 0,29MJ (3,4 μmol/J) dit is energie voor 120 g verdamping. De stralingsenergie van 1 mol LED licht is echter veel lager en is (afhankelijk van het lichtspectrum) ongeveer 0,19 MJ (~5,3 μmol/J). Dit geeft energie voor 77 g/m²/h verdamping.

Dit suggereert dat de stralingsenergie van de lampen de volledige energiebron zijn voor de verdamping. Echter, in de kas gaat ook nog een deel van de straling verloren naar de grond en is er uitstraling zodat de netto geabsorbeerde straling lager uitvalt. Een deel van de benodigde energie om 72 - 78 g/m²/h te verdampen komt dus nog steeds uit convectie. Wel bevestigd deze berekening de vuistregel dat de benodigde energie voor verdamping ruwweg voor 70 - 80% uit straling komt en 20 - 30% uit convectie-energie.

Bijlage VIII: Plantsapanalyses en wateranalyses

Tijdstip	Plantendeel	monstertype	Suikers	pH	EC	K - Kalium	Ca - Calcium	K / Ca	Mg - Magnesium	Na - Natrium	NH4 - Ammonium	NO3 - Nitraat	N uit Nitraat	N - Stikstof totaal
monstername			%		mS/cm	ppm	ppm		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
27-11-2023	Blad (jong)	Plantsap	0,8	6,7	11,2	4439	498	8,9	544	44	69	1047	236	1929
27-11-2023	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,0	13,1	4135	2068	2,0	947	30	39	2155	486	1202
4-12-2023	Blad (jong)	Plantsap	1,2	6,8	10,6	4277	445	9,6	566	40	108	748	169	2429
4-12-2023	Blad (oud)	Plantsap	0,3	7,0	13,2	4003	2356	1,7	945	40	30	3799	858	1544
11-12-2023	Blad (jong)	Plantsap	0,9	7,0	11,4	4622	400	11,6	473	36	168	881	199	2768
11-12-2023	Blad (oud)	Plantsap	0,1	7,5	14,3	4335	1897	2,3	735	44	60	4728	1067	1816
18-12-2023	Blad (jong)	Plantsap	0,7	7,1	10,2	3862	363	10,6	554	25	182	564	127	3166
18-12-2023	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,6	14,0	4198	1848	2,3	741	35	82	4666	1053	1818
2-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,9	7,0	11,3	4651	516	9,0	534	32	125	948	214	2651
2-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,0	15,0	4386	1700	2,6	577	54	28	6732	1520	2150
8-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,8	7,0	11,7	4338	472	9,2	522	32	135	1079	244	2600
8-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,1	14,8	4243	1878	2,3	599	52	27	7057	1593	2182
15-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,5	7,2	10,4	4013	330	12,2	498	33	301	691	156	2788
15-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,5	13,7	3754	2188	1,7	807	43	164	4696	1060	1705
22-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,7	6,8	10,6	3937	326	12,1	450	22	104	767	173	2254
22-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	6,8	14,7	4459	1574	2,8	568	37	28	6230	1406	2086
29-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,8	7,1	11,4	4881	414	11,8	533	36	145	980	221	2385
29-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,3	14,3	4469	1740	2,6	598	38	38	5951	1343	1898
5-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,7	6,7	10,0	4266	340	12,5	496	24	155	578	131	2066
5-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,1	6,7	13,3	3829	1417	2,7	457	34	33	6664	1504	1949
12-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,6	6,0	7,8	3150	393	8,0	399	66	96	292	66	1450
12-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,1	6,7	13,7	4330	1579	2,7	482	33	25	6380	1440	1844
19-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,7	6,9	10,6	4075	362	11,3	489	19	150	593	134	2257
19-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,1	7,0	14,0	3845	1621	2,4	412	29	26	6159	1390	1895
26-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,7	6,9	10,9	4650	324	14,3	514	23	129	586	132	2708
26-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	7,0	13,5	4413	1870	2,4	525	22	64	4458	1006	1781
4-3-2024	Blad (jong)	Plantsap	1,0	6,9	10,2	4177	246	17,0	400	24	130	465	105	2346
4-3-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	6,7	12,6	3325	1211	2,8	372	23	19	5099	1151	1655
11-3-2024	Blad (jong)	Plantsap	0,6	7,0	10,1	4022	249	16,2	476	20	244	214	48	2314
11-3-2024	Blad (oud)	Plantsap	0,2	6,9	13,4	3832	1438	2,7	498	29	28	5324	1202	1701

Tijdstip	Plantendeel	monstertype	Cl - Chloride	S - Zwavel	P - Fosfaat	Si - Silicium	Fe - IJzer	Mn - Mangaan	Zn - Zink	B - Borium	Cu - Koper	Mo - Molybdeen	Al - Aluminium
monstername			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
27-11-2023	Blad (jong)	Plantsap	372	602	627	31,00	1,90	0,96	3,50	0,91	0,86	0,57	0,06
27-11-2023	Blad (oud)	Plantsap	240	893	187	15,90	1,64	1,23	1,31	2,77	0,23	0,84	0,25
4-12-2023	Blad (jong)	Plantsap	268	594	615	29,20	1,77	2,12	4,88	1,11	1,21	0,48	0,04
4-12-2023	Blad (oud)	Plantsap	187	725	127	27,30	2,35	2,74	1,92	2,32	0,97	0,79	0,22
11-12-2023	Blad (jong)	Plantsap	231	563	491	43,40	2,33	2,18	4,49	1,32	1,01	0,48	0,06
11-12-2023	Blad (oud)	Plantsap	115	626	52	55,30	2,04	2,74	1,69	3,04	0,80	0,90	0,12
18-12-2023	Blad (jong)	Plantsap	205	616	437	39,10	2,58	2,17	5,50	1,48	1,20	0,54	0,08
18-12-2023	Blad (oud)	Plantsap	66	652	49	54,50	1,58	2,58	1,28	3,35	0,66	1,27	0,12
2-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	359	650	520	31,50	2,12	2,54	4,87	1,58	1,00	0,48	0,10
2-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	124	672	97	33,80	2,27	2,42	1,22	2,96	0,44	0,78	0,15
8-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	462	607	370	34,10	1,43	1,78	4,22	1,56	0,93	0,41	0,04
8-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	134	637	78	38,40	1,96	2,32	1,06	2,69	0,54	0,45	0,08
15-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	284	725	469	49,10	1,94	0,81	5,65	1,57	1,11	0,48	0,05
15-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	81	873	61	67,10	3,27	2,80	1,38	4,93	0,51	0,81	0,30
22-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	276	539	595	32,90	1,83	1,78	3,60	1,10	0,92	0,35	0,04
22-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	118	646	144	29,50	2,47	1,68	0,96	2,78	0,39	0,58	0,11
29-1-2024	Blad (jong)	Plantsap	282	610	500	44,10	1,70	1,92	4,24	1,42	0,89	0,37	0,04
29-1-2024	Blad (oud)	Plantsap	87	629	67	45,30	2,35	1,71	0,99	2,96	0,43	0,50	0,09
5-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	203	577	628	33,40	1,81	2,16	3,14	0,98	0,95	0,45	0,10
5-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	115	554	143	27,70	1,92	1,66	0,71	2,08	0,38	0,43	0,19
12-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	160	352	382	28,60	12,96	2,19	8,98	2,19	0,58	0,40	1,12
12-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	86	607	155	37,70	2,81	1,66	0,86	2,13	0,29	0,50	0,11
19-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	275	585	466	42,60	1,96	2,22	3,96	1,42	0,84	0,34	0,08
19-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	72	514	68	43,20	2,23	1,84	0,77	2,36	0,43	0,32	0,11
26-2-2024	Blad (jong)	Plantsap	274	699	594	48,70	1,90	2,13	3,90	1,60	0,85	0,41	0,10
26-2-2024	Blad (oud)	Plantsap	65	705	114	56,40	3,37	2,84	1,01	3,31	0,49	0,55	0,13
4-3-2024	Blad (jong)	Plantsap	268	569	639	47,80	1,58	2,01	3,85	1,34	0,88	0,34	0,09
4-3-2024	Blad (oud)	Plantsap	60	708	139	54,70	2,94	1,97	0,69	3,71	0,32	0,36	0,15
11-3-2024	Blad (jong)	Plantsap	209	533	587	52,70	1,91	1,68	3,78	1,25	0,81	0,27	0,06
11-3-2024	Blad (oud)	Plantsap	76	624	113	48,00	4,28	1,21	0,67	3,44	0,36	0,39	0,12

Tijdstip		pH	EC	K -	Ca -		Mg -	Na -	NH4 -	NO3 -	Cl -	S -
monstername	monstertype		mS/cm	Kalium mmol/l	Calcium mmol/l	K / Ca	Magnesium mmol/l	Natrium mmol/l	Ammonium mmol/l	Nitraat mmol/l	Chloride mmol/l	Zwavel mmol/l
27-11-2023	Gietwater	5,80	3,20	11,40	5,90	1,94	1,90	0,70	1,66	24,20	0,60	1,70
27-11-2023	Drainwater	7,40	1,80	4,70	4,80	0,98	1,70	1,30	0,29	11,20	0,50	2,20
4-12-2023	Gietwater	5,60	3,00	10,10	5,40	1,89	1,80	0,70	1,43	21,00	0,80	1,80
4-12-2023	Drainwater	7,10	2,20	2,90	6,20	0,47	2,20	1,50	0,03	14,50	1,30	2,50
11-12-2023	Gietwater	5,70	3,40	11,20	5,70	1,95	1,90	0,70	1,66	22,70	0,50	1,70
11-12-2023	Drainwater	7,50	2,50	3,60	6,90	0,53	2,60	2,00	0,00	15,90	1,10	2,60
18-12-2023	Gietwater	5,80	3,20	11,70	5,90	1,99	2,00	0,70	1,63	23,30	0,50	1,70
18-12-2023	Drainwater	7,40	2,40	2,90	7,50	0,39	2,80	1,80	0,06	16,50	1,20	2,80
27-12-2023	Gietwater	5,40	3,30	12,00	6,10	1,97	2,00	0,70	1,79	24,80	0,70	1,70
27-12-2023	Drainwater	7,70	1,60	0,90	5,70	0,16	2,30	1,90	0,04	8,80	1,30	3,00
2-1-2024	Gietwater	5,60	3,40	12,60	6,50	1,94	2,20	0,70	1,86	25,20	0,80	1,90
2-1-2024	Drainwater	8,10	1,90	0,40	7,70	0,06	2,90	2,00	0,03	10,20	1,20	4,00
8-1-2024	Gietwater	5,50	3,50	12,90	6,60	1,96	2,20	0,70	1,99	26,40	0,60	1,90
8-1-2024	Drainwater	8,20	1,70	0,40	7,20	0,05	2,20	1,70	0,02	8,80	0,60	3,50
15-1-2024	Gietwater	5,60	3,50	13,10	6,70	1,96	2,20	0,80	1,86	27,10	0,60	1,90
15-1-2024	Drainwater	7,60	1,80	1,90	6,40	0,30	2,10	1,40	0,03	12,70	0,60	2,30
22-1-2024	Gietwater	5,60	3,60	13,00	6,60	1,99	2,20	0,70	1,84	26,90	0,60	1,90
22-1-2024	Drainwater	7,40	2,10	3,20	6,90	0,47	2,50	1,40	0,02	15,80	0,90	2,50
29-1-2024	Gietwater	5,70	3,50	13,10	6,60	2,00	2,20	0,80	1,93	26,10	0,60	1,90
29-1-2024	Drainwater	7,00	2,20	3,60	6,90	0,53	2,40	1,40	0,03	15,70	0,60	2,30
5-2-2024	Gietwater	5,70	3,60	13,00	6,40	2,03	2,20	0,80	1,88	25,00	0,70	1,90
5-2-2024	Drainwater	6,10	3,20	7,20	8,20	0,88	2,90	1,40	0,18	23,60	0,90	2,20
12-2-2024	Gietwater	5,40	3,40	12,50	6,30	1,98	2,20	0,80	1,78	26,90	0,60	1,90
12-2-2024	Drainwater	6,50	3,10	6,50	8,80	0,74	3,30	1,70	0,03	24,00	1,10	2,80
19-2-2024	Gietwater	5,10	3,60	13,20	6,50	2,03	2,20	0,80	1,82	26,50	0,70	1,90
19-2-2024	Drainwater	6,60	3,10	5,80	9,10	0,64	3,30	1,80	0,06	24,00	1,20	2,80
26-2-2024	Gietwater	4,80	3,50	12,80	6,40	2,00	2,10	0,80	1,90	26,70	0,50	1,80
26-2-2024	Drainwater	6,70	2,80	5,60	8,20	0,68	3,00	1,50	0,03	22,40	0,80	2,50
4-3-2024	Gietwater	4,40	3,60	13,10	6,70	1,98	2,20	0,80	1,59	26,40	0,80	1,90
4-3-2024	Drainwater	6,90	3,50	4,70	11,00	0,43	4,20	1,90	0,05	26,80	1,50	3,60
11-3-2024	Gietwater	4,40	3,50	12,90	6,60	1,95	2,20	0,80	1,54	25,80	0,60	1,80
11-3-2024	Drainwater	6,80	4,70	8,60	13,90	0,62	5,50	2,50	0,03	36,20	1,80	4,60
18-3-2024	Gietwater	4,40	3,40	11,50	6,10	1,89	2,00	0,70	1,41	24,50	0,50	1,70
18-3-2024	Drainwater	6,20	4,40	8,60	11,50	0,75	4,60	2,10	0,06	32,80	1,20	4,00

Tijdstip		HCO3 -	P -	Si -	Fe -	Mn -	Zn -	B -	Cu -	Mo -	Al -
monstername	monstertype	Bicarbonaat mmol/l	Fosfaat mmol/l	Silicium mmol/l	IJzer μmol/l	Mangaan μmol/l	Zink μmol/l	Borium μmol/l	Koper μmol/l	Molybdeen μmol/l	Aluminium μmol/l
27-11-2023	Gietwater	0,01	1,82	0,10	28,90	14,00	4,80	42,70	1,30	1,10	3,30
27-11-2023	Drainwater	2,70	0,39	0,10	77,30	7,90	4,70	60,10	1,90	0,70	1,50
4-12-2023	Gietwater	0,06	1,73	0,10	27,30	13,60	5,20	45,00	1,30	1,00	3,50
4-12-2023	Drainwater	1,09	0,11	0,00	82,90	6,40	1,50	60,80	1,50	0,90	4,70
11-12-2023	Gietwater	0,01	1,83	0,10	28,60	16,40	7,20	50,30	1,50	0,70	3,60
11-12-2023	Drainwater	1,49	0,07	0,00	85,50	8,00	5,10	77,10	2,30	0,70	5,30
18-12-2023	Gietwater	0,04	1,85	0,10	28,50	16,60	7,40	50,80	1,50	0,80	4,10
18-12-2023	Drainwater	1,18	0,09	0,00	79,60	13,40	6,40	80,00	2,30	0,50	6,60
27-12-2023	Gietwater	0,08	1,94	0,10	30,40	17,30	7,80	52,60	1,60	0,80	4,80
27-12-2023	Drainwater	2,63	0,08	0,00	96,10	8,50	10,20	92,80	2,50	0,70	5,20
2-1-2024	Gietwater	0,15	2,04	0,10	32,90	17,70	8,20	56,10	1,70	1,00	4,80
2-1-2024	Drainwater	3,06	0,03	0,00	146,00	7,10	14,90	121,30	3,50	0,60	7,60
8-1-2024	Gietwater	0,10	2,18	0,10	33,00	17,70	8,60	56,80	1,80	1,10	5,70
8-1-2024	Drainwater	3,78	0,03	0,00	151,60	6,40	14,30	109,90	3,50	0,50	5,50
15-1-2024	Gietwater	0,05	2,18	0,10	32,50	17,40	8,50	55,00	1,90	1,10	4,20
15-1-2024	Drainwater	2,01	0,11	0,00	98,80	9,90	10,70	83,00	2,60	0,60	5,40
22-1-2024	Gietwater	0,04	2,08	0,10	30,40	17,30	7,80	53,00	1,70	0,80	5,30
22-1-2024	Drainwater	1,30	0,26	0,10	80,40	12,00	8,30	75,30	2,30	0,40	8,40
29-1-2024	Gietwater	0,08	2,14	0,10	34,30	17,20	7,80	50,70	1,80	1,00	4,40
29-1-2024	Drainwater	1,14	0,42	0,10	82,40	13,90	8,70	72,90	2,40	0,40	9,10
5-2-2024	Gietwater	0,17	2,09	0,10	39,70	21,90	7,80	56,80	1,80	0,80	4,50
5-2-2024	Drainwater	0,05	0,60	0,10	78,30	22,40	8,30	69,90	2,60	0,30	14,70
12-2-2024	Gietwater	0,05	2,04	0,10	37,90	21,90	8,50	55,80	1,70	0,80	5,40
12-2-2024	Drainwater	0,13	0,65	0,10	94,30	23,90	9,90	79,00	2,70	0,40	14,70
19-2-2024	Gietwater	0,06	2,12	0,10	42,50	22,20	9,40	59,10	1,80	0,80	5,20
19-2-2024	Drainwater	0,19	0,75	0,10	110,00	25,50	14,10	86,50	3,30	0,50	11,30
26-2-2024	Gietwater	0,04	2,10	0,10	39,00	21,50	9,00	54,40	1,90	1,00	9,20
26-2-2024	Drainwater	0,18	0,66	0,10	98,00	23,90	11,70	76,00	2,70	0,50	9,50
4-3-2024	Gietwater	0,06	2,12	0,10	42,30	21,40	9,80	58,30	1,90	1,10	8,30
4-3-2024	Drainwater	0,47	0,41	0,10	122,50	22,90	16,90	92,20	3,30	0,90	13,50
11-3-2024	Gietwater	0,09	2,08	0,10	39,20	20,40	9,00	50,20	1,70	1,00	6,90
11-3-2024	Drainwater	0,39	0,53	0,10	146,00	28,90	19,80	104,40	4,30	0,70	12,10
18-3-2024	Gietwater	0,03	1,92	0,10	36,50	18,80	8,70	48,00	1,60	0,90	8,20
18-3-2024	Drainwater	0,11	0,79	0,10	129,30	24,50	19,20	88,70	4,30	0,60	17,40