



TEKNOLOGIER TIL VERTIKALT LANDBRUG

- VIDENSYNTSE

CARL-OTTO OTTOSEN

DCA RAPPORT NR. 213 • JANUAR 2023 • RÅDGIVNING



AARHUS
UNIVERSITET

DCA - NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG

TEKNOLOGIER TIL VERTIKALT LANDBRUG

- Vidensyntese

DCA RAPPORT NR. 213 · JANUAR 2023 · RÅDGIVNING

FORFATTER:

Professor Carl-Otto Ottosen

Institut for Fødevarer

Aarhus Universitet



AARHUS
UNIVERSITET

DCA - NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG



Datablad

Titel:	Teknologier til vertikalt landbrug – Vidensyntese
Serietitel og nummer:	DCA rapport nr. 213
Rapporttype:	Rådgivningsrapport
Udgivelsesår:	Februar 2023. 1. udgave. 1. Oplag
Forfatter:	Professor MSO Carl-Otto Ottosen, Institut for Fødevarer, AU
Fagfællebedømmelse:	Lektor Kristian Holst Laursen, Institut for Plante – og Miljøvidenskab, KU
Kvalitetssikring, DCA:	Specialkonsulent Susanne Hansen, DCA Centerenheden, AU
Rekvirent:	Landbrugsstyrelsen, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM)
Dato for bestilling/levering:	26.07.2022/ 14.11.2022
Journalnummer:	2022-0331352
Finansiering:	Besvarelsen er udarbejdet som led i "Rammeaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening" indgået mellem Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM) og Aarhus Universitet under ID nr. 6.29 i "Ydelsesaftale Planteproduktion 2022-2025".
Ekstern kommentering:	Nej.
Eksterne bidrag:	Nej.
Kommentarer til besvarelse:	Rapporten præsenterer resultater, som ved udgivelsen ikke har været i eksternt peer review eller er publiceret andre steder. Ved en evt. senere publicering i tidsskrifter med eksternt peer review vil der derfor kunne forekomme ændringer.
Citeres som:	Ottosen, C.O.. 2022. Teknologier til vertikalt landbrug - Udarbejdelse af vidensyntese vedr vertikalt landbrug (vertical farming). 37 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 14.11.22.
Ophavsret:	Rapporten er omfattet af gældende regler om ophavsret
Layout:	Jette Ilkjær, DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug
Fotos forside:	Colourbox
Sideantal:	37
ISBN:	Trykt version: 978-87-94420-04-4. Elektronisk version: 978-87-94420-05-1
ISSN:	2248-1684
Tryk:	Digisource.dk
Internetversion:	https://dcapub.au.dk/djfpublikation/djfpdf/DCArapport213.pdf

Indholdsfortegnelse

Baggrund	4
1 Resume	5
2 Introduktion	8
2.1 Definitioner	8
2.2 Status for vertikalt landbrug i Europa.....	17
3 Ressourceforbrug og relaterede problematikker i vertikalt landbrug	21
3.1 Energi	21
3.2 Vand, gødning og sprøjtemidler.....	24
3.3 Samlet CO ₂ -aftryk.....	26
3.4 Automatisering.....	27
3.5 Bæredygtighed	27
4 Teknologitilskudsordningen og vertikal farming	29
5 Perspektiver for forskning og udvikling i vertikalt landbrug	31
6 Referencer	34

Baggrund

Landbrugsstyrelsen har i en bestilling sendt til DCA - Nationalt center for Jordbrug og Fødevarer (DCA) ved Aarhus Universitet (AU) ønsket en beskrivelse af vertikalt landbrug. Herunder har de ønsket viden om bl.a. følgende:

Hvilke former for vertikalt landbrug er beskrevet? Herunder "rene" vertikale landbrug i flere lag og hybrid-former, hvor kun en del af produktionen forekommer i lag.

Beskrivelse af udbredelse i DK, Europa og på verdensplan.

Hvilke af disse former anvendes i kommerciel produktion og hvilken type (krydderurter, grønsager, prydeplanter mv.), både i DK, Europa og på verdensplan?

Hvilke referencesituationer kan defineres for disse former som ikke er direkte sammenlignelige? Focus kan være i forhold til eksisterende danske produktionssystemer for de aktuelle produkter, da teknologien skal være mere ressourcevenlige end den eksisterende teknik.

Hvilke positive og negative effekter er der for de forskellige former, både ift. klima og miljø, herunder energiforbrug, CO₂ aftryk, næringsstofforbrug, vandingsforbrug, pesticidforbrug, men også andet.

Beskrivelse af anvendelse af eksisterende teknologier mv, i de forskellige former for vertikalt landbrug.

Videnssynthesen vil danne baggrund for en ny ansøgningsrunde Miljø- og klimateknologi i 2023/2024. Der er politisk ønske om at understøtte vertikale landbrug gennem denne tilskudsordning. Målgruppen for tilskudsordningen er primære jordbrugere (herunder væksthushavere), som har en bedriftsstørrelse som kræver mindst en halvtidsstilling at drive. For at kunne tilbyde mulighed for tilskud til investeringer skal det være muligt at kunne fastsætte en standardeffekt for investeringer, beregnet ift. referencesituationen.

Resume

Efterhånden som jordressourcerne til landbruget falder og efterspørgsel på mad stiger, øges udfordringer med en robust bæredygtig fødevareproduktion. En af de metoder, man overalt i verden har satset på for at sikre eller forlænge planteproduktionen, er, det man med en fællesbetegnelse kalder controlled environment agriculture (CEA), der rummer alle "beskyttede" eller delvis kontrollerede planteproduktionsformer i væksthuse og bygninger. Det betyder, at der bruges flere ressourcer på belysning, opvarmning, køling og affugtning sammenlignet med markbrug, men det giver en øget dyrkningssikkerhed og -udbytte. CEA giver i princippet mulighed for at producere de fleste fødevarer inklusiv protein- og kulhydratafgrøder altså korn og bælgeplanter uanset sæson, men omkostningerne ved dyrkning og høst gør det næppe rentabelt.

Vertikalt landbrug er blevet udråbt som en af det 21. århundredes megatrends, men omkostninger, ressourceforbrug og udbytte samt udvalget af afgrøder er på nuværende tidspunkt en begrænsende faktor. I denne rapport gennemgås definitionerne på vertikalt landbrug i forhold til eksisterende sammenlignelige produktionsmetoder, som for danske produktionsforhold typisk er væksthuse. De potentielle fordele og ulemper for de nuværende afgrøder i vertikale landbrugssystemer vurderes.

CEA-systemer er energikrævende generelt og energiforbruget stiger med graden af kompleksitet i produktionssystemet, hvilket i grunden er logisk nok – f.eks. jo mindre naturligt lys der tilføres en plante jo mere energi er der brug for til belysning for at drive planternes fotosyntese. Lys er i denne sammenhæng defineret som fotosynteseaktiv stråling (photosynthetic active radiation, PAR) i bølglængdeområdet 400-700 nm, og det udgør den største del af energiforbruget i vertikalt landbrug. Selvom man kan optimere energieffektiviteten i alle typer af CEA-systemer er det vigtigt at se på det samlede CO₂ aftryk for de forskellige produktionssystemer både i et lag og i et vertikalt landbrug i forhold til f.eks. væksthuse, da det samlede energiaftryk er afgørende uanset om energikilden er grøn eller fossil. Dette kan ændre sig, når vedvarende energi er mere udbredt, men er en mulighed hvor der er fri adgang til vedvarende energi som på Island eller Grønland.

De få tilgængelige uafhængige beregninger af energiforbrug viser, at CO₂ aftrykket er betydeligt større i vertikalt landbrug sammenlignet med væksthuseproduktion, men modeldata og simuleringer viser præcis samme resultater. De få konkrete målinger og livscyclusanalyser (LCA) af vertikale landbrug viser, at vertikalt landbrug har 2-2.5 højere CO₂ aftryk sammenlignet med væksthuseproduktion. Udfordringen er, at der ikke er to ens vertikale landbrugsproduktionssystemer, og der findes ikke uafhængige energiforbrugsdata fra danske vertikale landbrug, hvilket gør en generalisering svært. CO₂-emissionen fra vertikalt landbrug kan reduceres ved at anvende ikke-fossil energi, når det på et tidspunkt er tilstrækkeligt med grøn energi på markedet, men det samme kan siges om alle produktioner i CEA, hvor man anvender el og på sigt også væksthuse, der kan omstilles til ren el via varmepumper.

Forbruget af andre ressourcer som vand, gødningsstoffer og pesticider skønnes derimod ikke at være væsentligt forskelligt mellem forskellige CEA-systemer, men man har et klart lavere forbrug sammenlignet med markproduktion. Da automatiseringsgraden i vertikalt landbrug varierer meget, er det ikke muligt at bedømme arbejdskraftforbruget, men typisk har selv mindre gartnerier investeret i automatisering, mens mindre vertikale landbrug har et stort arbejdskraftbehov til håndtering af planter.

Hvis vertikale landbrugssystemer skal udvikles med et lavere CO₂ aftryk som nærmer sig det et moderne væksthuse har i dag, er der behov for mere udvikling og forskning i området, med fokus på at reducere energiforbruget markant. En vis standardisering af design af vertikale landbrug mht. styringsteknologier er central, fordi man ellers skal lave specifikke løsninger. Indsatsen kan baseres på erfaringen fra væksthuse og mere energieffektive LED lamper både med hensyn til lysintensitet og -spektralsammensætning, som tilpasses til de forskellige arter eller produktionsformen. Bladenes pigmenter absorberer lysenergien med henblik på fotosyntese, samtidig som fotoreceptorer registrerer lysets forskellige bølgelængder, der styrer plantens udvikling, form og indholdsstoffer. Den spektrale sammensætning af belysningen, såsom blå bølgelængder i LED-belysning, har vist sig at ændre koncentrationerne af ernæringsmæssigt vigtige primære og sekundære metabolitter i visse vegetabilsk afgrøder såsom salat eller basilikum afgrøder. Normalt bruger man LED lamper i det synlige område, men de ultraviolette og langrøde lys kan bruges til at regulere strækingsvækst og metabolit sammensætning.

Ud over bølgelængde er styret belysning med hensyn til intensitet og varighed et andet område, hvor potentielle optimeringsstrategier er mulige og kræver yderligere undersøgelse for brug i vertikal farming, idet de er udviklet til brug i væksthuse med en del naturligt lys (Jørgensen et al. 2016). Energiprismønstret er også ændret i 2022, så der skal ske en tilpasning af softwaren til styring.

Tildeling af næringsstoffer fra diverse gødninger for at optimere vækst, kvalitet og indholdsstoffer er et andet muligt forskningsområde, som ikke nødvendigvis reducerer ressourceforbruget, men øger værdien af afgrøden både pga. smag, udseende, holdbarhed og næringsværdi.

Der er en meget begrænset udvikling af sorter, der er tilpasset vertikalt landbrug, så der er brug for forædling eller selektion af sorter, der er kompatible med kontrollerede indendørs miljøforhold. For eksempel kan det være muligt at øge afgrødeudbyttet ved at finjustere variabler som temperatur, luftfugtighed og CO₂-niveauet og spektralsammensætningen, men effekten varierer meget mellem arter og sorter. Derfor kan brug af sorter, der kræver mindre lys eller udnytter det installerede lys bedre, være et vigtigt indsatsområde. Klimastyring i væksthuse er blevet mere dynamisk og baseret på udnyttelse af den frie varme fra solen og de konkrete energipriser, og alene dette kan medvirke til en ikke ubetydelig energireduktion i vertikale landbrug. Der er behov for at overveje om man kan tilpasse de energibesparende klimastyringsmodeller til vertikalt landbrug.

Der kan udvikles højværdiprodukter til farmaceutisk industri eller lignende, hvor dyrkningsbetingelserne kan påvirke og styre indholdsstoffer, hvis man kan finde de rette sorter. Generelt er der brug for nytænkning i vertikalt landbrug for at reducere CO2 aftrykket.

Det mest åbenlyse udviklingsområde er brug af vertikale produktionsmetoder i forbindelse med væksthushproduktion – en slags hybridløsning, hvor man bruger elementer fra vertikalt landbrug i forbindelse med væksthushproduktion til at optimere småplanteproduktionen.

Introduktion

1.1 Definitioner

Den fælles betegnelse for beskyttet produktion er 'controlled environment agriculture' (CEA), der i princippet dækker alt fra plast-væksthuse (tunnelhuse), traditionelle drivhuse af glas til helt lukkede klimakamre med et lags planteproduktion og i sidste ende multilagsdyrkning i væksthuse eller lukkede rum og bygninger, hvor man dyrker afgrøder, mens man kontrollerer miljøet omkring planter, herunder belysning (og spektralsammensætning), temperatur, CO₂, fugt, vanding, gødning og andre faktorer, der påvirker planternes vækst, udvikling og holdbarhed (postharvest).

I princippet kan man gruppere CEA i nogle kategorier, som har stigende kompleksitet selvom der er store variationer indenfor hver af typerne (for uddybende oversigt se tabel 1). Det skal bemærkes at der ikke findes nogen oversigt over arealet af det forskellige typer, men glasdrivhuse er absolut dominerede. Målet med dem alle er produktion af planter til en række forskellige formål, men investerings- og driftsomkostningerne stiger med kompleksiteten;

- **TUNNEL** refererer til afgrøder dyrket i plasttunnel til beskyttelse mod udendørs klima. De kan normalt kun vandes/gødes, og de benyttes mest som forlængelse af produktionsperioden og kan mindske brug af sprøjtemidler. De har ikke normalt automatisk klimakontrol og kaldes også bøjlehuse eller tunnelhuse men kan have regulérbar ventilation og opvarmning.
- **DRIVHUS** refererer til en klimareguleret struktur med vægge og tag hovedsageligt lavet af et gennemslagt materiale, hvori der dyrkes afgrøder, i Asien ofte kaldet open plant factories. Drivhuset er fuldt klimastyret af en klimacomputer med brug af naturligt lys, og gødningssystem og tillader brug af kunstlys og CO₂. Drivhuse kan være på marken eller på fladehustage men dyrkning sker hovedsageligt på flad mark.
- **CONTAINER** refererer til en klimareguleret (skibs)container, der kun bruger kunstig belysning (ingen sollys) til afgrødeproduktion, normalt i flere lag, og som kan placeres efter behov.
- **INDOOR FARM** refererer til afgrødeproduktion, der udnytter kunstig belysning i stedet for sollys. Dette kan omfatte lagerlokaler, fabrikker og andre ombyggede indendørsrum. De kan være fuldt klimastyrede men ikke nødvendigvis i flere lag.
- **VERTIKALT LANDBRUG** er afgrødeproduktion, der bruger det lodrette rum for et tredimensionelt dyrkningssystem i højden. Systemet kan strække sig fra meget små mobile systemer, der f.eks. passer i et køkken (som en container), til store produktionsbedrifter, som i Asien oftest kaldes 'closed plant factories' eller PFAL (plant factory with artificial light), som normalt er i specialbyggede rum, der er fuldt isoleret og forseglede. Graden af teknologi i vertikalt landbrug er meget varierende fra små

simple systemer til mere teknologiske. Uanset produktionssystemer er hovedafgrøden typisk produceres mikrogreen (grønne urter), krydderurter og salat.

Tabel 1: Tekniske installationer i -'controlled environment agriculture' (CEA) systemer (se (Kozai 2019, Stanghellini 2019)

Type	Dyrkning i jord	Dyrkning i potter	Dyrkning i vandkultur	Opvarmning	Vandingssystem	Gødning	Kunstlys	Affugtningsbehov	Energibehov
Plastic tunnel	Ja	Ja	Nej	Nej	Dryp/-sprinkler	Dryp/-sprinkler	Be-grænset	Ventilation	Lille
Væksthus	Be-grænset	Oftest	Er muligt	Vandbåren varme	Recirkulerende ofte baseret på regnvand	Med vanding	Ja	Ventilations- og varme strategi	Medium
Lukkede væksthuse	Nej	Oftest	Er muligt	Vand- eller luftbåren varme	Recirkulerende, ofte baseret på regnvand	Med vanding	Ja	Aktiv affugtning	Medium til højt
Vertikalt landbrug i el- eller kombineret med væksthuse	Nej	Oftest	Er muligt	Vand- eller luftbåren varme	Recirkulerende, ofte baseret på regnvand	Med vanding	Ja	Aktiv affugtning og ventilations- og varme strategi	Medium til højt
Vertikalt landbrug lille skala	Nej	Be-grænset	Ja	Luftbåren varme	Vandkultur	Med vanding	Ja, intet naturligt lys	Ventilation/affugtning	Højt
Vertikalt landbrug stor skala	Nej	Nej	Ja	Luftbåren varme	Vandkultur	Med vanding	Ja, intet naturligt lys	Ventilation/affugtning	Meget højt

Det skal nævnes, at alle kategorier findes i mange størrelser og der kan være de samme styringsmetoder i flere forskellige dyrkningssystemer, men det er nok en undtagelse. Status for ressource/investeringsbehov er vist som en oversigt i tabel 2. Generelt har der været en tendens til at vertikale produktionssystemer udvikles af forskellige firmaer uafhængigt af hinanden ofte med relativt lille kendskab til planteproduktion. Det har typisk resulteret i underdimensionering af køl/ventilation, som giver problemer med luftfugtigheds-skader. Først sent gik firmaer med erfaring fra væksthusteknologi ind i markedet. I gartnerierhvervet har man gennem mange år fundet tekniske løsninger for de potentielle problemer for at få en ensartet fordeling af temperatur, luftfugtighed (i realiteten affugtning) og lys, der alt sammen bruger energi. Vertikalt landbrug i DK er i dag på et meget tidligt stadie sammenlignet med den etablerede væksthusektor.

Tabel 2. Status på 'controlled environment agriculture' (CEA) systemer til produktion af planter mht. perspektiver og omkostninger mv.

	Væksthus	Kombineret væksthushus og vertikalt landbrug	Vertikalt landbrug
Initiale investeringsomkostninger	Høje	Høje	Meget høje
Plantevalg	Ubegrænset, men typisk højværdiafgrøder	Ubegrænset, men typisk højværdiafgrøder	Begrænset til kort produktion og relativt få afgrøder
Danske ekspertiser på installation	Høj	Høj	Begrænset
Opvarmning	Medium (flere energikilder mulige)	Medium (flere mulige energikilder)	Udelukkende el
Belysning	Naturligt lys og kunstlys	Naturligt lys og kunstlys	Udelukkende kunstlys
Fugtstyring med ressourceforbrug	Minimum 25% af energiforbruget	Ca. 25% af energiforbruget	Skønnet > 25%
Vandforsyning/tab	Typisk regnvand, tab ved åbne vinduer og salg af planter	Typisk regnvand, tab ved åbne vinduer og salg af planter	Grundvand, tab ved affugtning (hvis det ikke kondenseres) og salg af planter
Næring	Uorganiske eller organiske gødning, der normalt recirkuleres	Uorganiske eller organisk gødning, der normalt recirkuleres	Uorganiske eller organiske gødninger, der normalt recirkuleres
Dyrkningsmedier	Organiske og ikke organiske dyrkningsmedier, hydroponi (vandkultur)	Organiske og ikke organiske dyrkningsmedier, hydroponi (vandkultur)	Organiske og ikke organiske dyrkningsmedier, hydroponi
CO₂-forsyning	Når vinduerne er lukkede	Når vinduerne er lukkede (evt. tilførsel til 400 ppm)	I lysperioder og når der er tab pga. ventilation
Pesticider	For fødevarer ikke muligt, biologisk bekæmpelse	For fødevarer ikke muligt, biologisk bekæmpelse	Anvendes normalt ikke, og biologiske midler kan være svært
Økologi	Godkendt i organiske dyrkningsmedier	Godkendt i organiske dyrkningsmedier For mikrogreen kan inerte organiske medier anvendes	Godkendt i organiske dyrkningsmedier. For mikrogreen kan inerte organiske medier anvendes
Arealudnyttelse (produktion per m² grundareal)	1:1	Høj	Meget høj, men afhænger af antal lag

Vertikalt landbrug blev lanceret i begyndelsen af 2000 (Despommier 2010) i høj grad baseret på amerikanske forhold, hvor det blev hævdet, at vertikalt landbrug ville kunne skabe et større areal til planteproduktion uden brug af større jordareal, reducere transportomkostningerne og CO₂-udledningen forbundet

med at flytte mad over lange afstande. Det ville også reducere det tab, der sker under transporten og dermed reducere madspildet. Despommier (2010) skitserede en række årsager til hvorfor vertikalt landbrug kunne være yderst attraktivt at investere i, såsom afgrødeproduktion hele året rundt, højere udbytter (seks gange eller mere afhængigt af afgrøde i forhold til marker), ingen problemer med tørke, oversvømmelser og skadedyr, beskyttelse af økosystemer, reduktion af patogene svampe, tilførsel af energi til nettet gennem metan generering fra kompost, reduktion af brugen af fossile brændstoffer (ingen traktorer, landbrugsmaskiner eller transport), og skabelse af nye arbejdspladser. Visionen er stor, men realiteterne svarer ikke helt til mulighederne fordi han fuldstændigt ignorerede udfordringer med kompleksitet i en multilagsproduktion og mere overraskede overså, at der er store væksthuseområder tæt på New York. Men udfordringerne for grøntsagsproduktionen, der traditionelt sker i Californien eller Mexico er blevet større pga. klimaforandringer og forbruget af fødevarer sker i høj grad i bycentre østpå selvom markedet i Californien for vertikal landbrug af stigende.

Urban farming, som vertikalt landbrug er en delmængde af, er dog en ikke veldefineret størrelse selv sammenlignet med væksthuseproduktion. Der har været nogen forvirring omkring fællesbegrebet urban farming (bylandbrug, byhaver), da det typisk har været fokuseret på lokalt producerede fødevarer i eller nær byerne (periurban farming), og dermed i princippet ikke inkluderer intensivt eller højteknologisk planteproduktion, som ligger til grund for vertikalt landbrug (Specht et al. 2016a, Benis and Ferrão 2018). I Danmark har man traditionelt haft mange handelsgartnerier omkring byerne, som er forsvundet eller omdannet til produktionsgartnerier.

Populariteten af ordet "vertikalt landbrug" med dyrkning uden jord og med kunstigt lys kan hænge sammen med, at de europæiske forbrugere foretrækker udtrykket "landbrug" frem for "fabrik", da ordet landbrug er forbundet med friske produkter. Produktion af planter i væksthuse på hustage, fra fabrikker eller storcentre er et delelement af urbant landbrug, men det sker sjældent i flere lag (Orsini et al. 2014). Udtrykket "zero-acreage landbrug" (ZLandbrug) bruges også for de typer af bylandbrug, der ikke bruger (landbrugs)jord, og det inkluderer også lavteknologiske alternativer (Specht et al. 2016b). Andre navne, der almindeligvis bruges, er "urban farm" eller "indendørs gård". Når (jordfrie) dyrkningsteknikker integreres med bygningsklimakontrol, bruges begrebet "bygningintegreret landbrug" (BIA) også, og der findes en række eksempler på hvordan produktionen kan integreres f.eks. ved universiteter (Zhang et al. 2018). Produktion i skyskrabere til intensiv fødevareproduktion i lukkede dyrkningssystemer omtales også som skyfarms (Al-Chalabi 2015).

Vertikalt landbrug var oprindeligt grundlæggende defineret som alle lodrette plantedyrkningssystemer i bygninger uden direkte brug af sollys. Dette kan omfatte flere stablede lag systemer kan strække sig fra meget små (mobile) systemer, der f.eks. passer i et køkken, til restauranter eller supermarkeder, til store produktionsbedrifter. Bygninger kan være skræddersyede til formålet med forsegling og optimerede til produktion (Kozai et al. 2020) som nok specielt har været tilfældet i Japan, men kan også etableres i eksiste-

rende bygninger som lagerhaller, fabrikslokaler i byer mv. En delmængde af vertikalt landbrug er "plante-fabrikker med kunstig belysning" (PFAL) som er planteproduktionsanlæg med en termisk isoleret og næsten lufttæt lagerlignende struktur, hvor planter dyrkes på hylder med lamper på hver hylde. For at udnytte det kræves klimaanlæg, affugtning, luftcirkulation, CO₂- og næringsopløsningsforsyningsenheder og en integreret styring.

At "stable" produktionen lodret øger effektiviteten af arealanvendelsen men medfører nogle tekniske komplikationer, da hvert lag skal forsynes med lys, ventilation og køling/affugtning. I begyndelsen brugte man lysstofrør som belysning, i dag bruges udelukkende LED'er i nybyggede PFAL'er på grund af deres kompakte størrelse, lave lampeoverfladetemperatur, høj effektivitet og variable lysspektre og -intensitet. Men LED afgiver også varme som oftest opadtil, så hylderne over lamperne opvarmes, så afhængigt af design kan det påvirke vandtemperaturen i dyrkningsvandet når lamper tændes og slukkes.

I praksis fokuseres denne rapport på kommercielle produktionssystemer både i lukkede og åbne produktionsformer (jvf. tabel 1 og 2) af opvarmede væksthuse og vertikale produktionssystemer. Det er de områder, som er relevante at sammenligne i Danmark og de nordiske lande og som på nuværende tidspunkt er omfattede af teknologistøtteordningerne.

CEA udspringer fra problemstillinger i Japan (høj befolkningstæthed, lille tilgængelighed af jord og høj vil-lighed til at betale for de perfekte afgrøder) og i USA (lang afstand mellem produktion af grønsager og forbrugere i bycentre). Japan med udgangspunkt i universitetet i Chobe har været ledende i lukkede pro-duktionssystemer (Kozai and Niu 2020). Interessant nok er energi ikke en problemstilling, der diskuteres i Japan. I en opdateret bog om vertikalt landbrug er der ikke nogen direkte kapitler om energiforbrug (Kozai and Niu 2020). En LCA analyse i Japan omtaler slet ikke energi, men udelukkende på et reduceret vand-, gødnings- og arealforbrug i forhold til markproduktion (Liu et al. 2022).

Typisk for CEA er en høj grad af kontrolleret klimastyring (fugt, temperatur) med tilførsel af kunstlys via LED-belysning. Klimastyringen kan både være vand- og luftbaseret varme, og begge kan bruges til at affugte luften. Aircondition giver en konstant luftstrøm, som kan beriges med kuldioxid (CO₂) for yderligere at fremme plantevækst, men CO₂ kan også doseres som ren CO₂ med fordelingsslangor nær planterne. I væksthuse kan affugtningen ske via åbning af vinduer, men jo mere systemet er lukket jo større krav er der til en effektiv, aktiv affugtning. Dyrkning i vertikalt landbrug kan ske i et organisk dyrkningsmedie (fx spag-num), i inerte medier (stenuld, perlite) eller i vandkultur (der inkluderer) aeroponics (hvor vand med gødning sprayes på rødderne) (Tabel 2). Det mest almindelige i vertikalt landbrug i DK er vandkultur enten direkte i vand eller med vandstrøm (Nutrient flow system). I nogle produktionssystemer undgår man jord (pga. sygdomsrisiko), men både spiring af frø og formering af stiklinger kan være en udfordring, da rødderne normalt udvikler sig bedst i et substrat. Typisk vil man både i væksthusproduktion og lukkede produktionssystemer have en fase af formering, der kræver helt specielle klimaforhold (lys, fugtighed, temperatur).

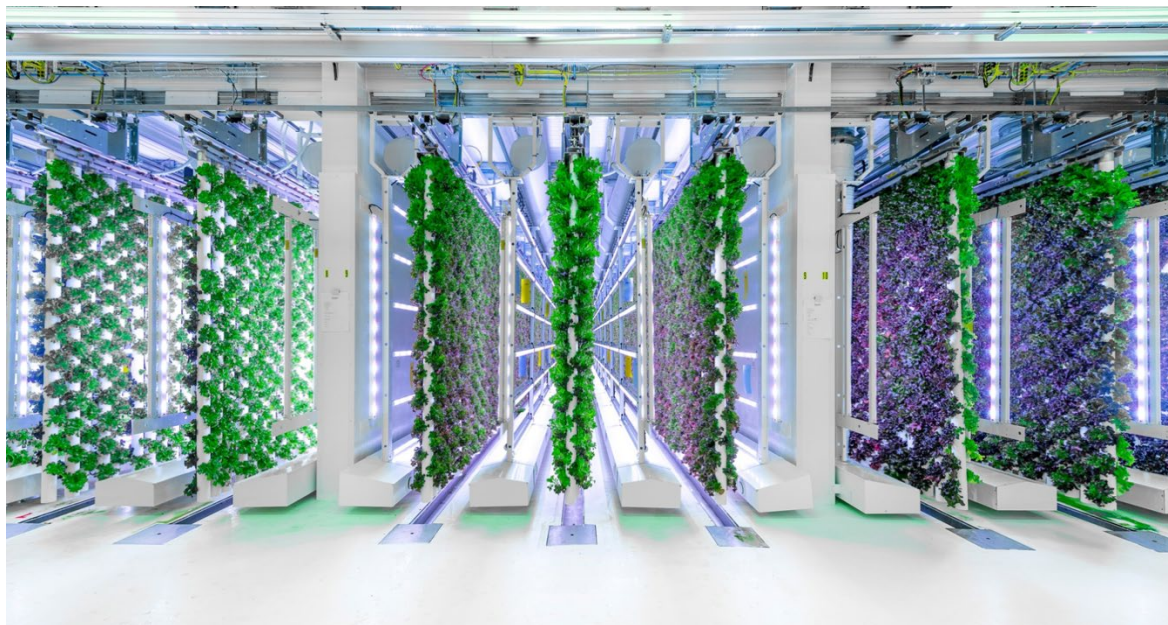
Afhængigt af design af dyrkningsforholdene kan både luft- og vandtemperaturer holdes på bestemte niveauer, der regulerer næringsoptagelse og optimerer hastigheden af plantevæksten, men der er stort set altid en vis variation både vandret og lodret, som gør at nogle områder med planter udsættes for suboptimale forhold. Specielt fugtigheden kan skabe problemer med fysiologiske skader på planterne (Giday et al. 2014) både ved høj konstant fugtighed eller længere perioder med meget fugtighed, som gør, at planternes spalteåbninger ikke fungerer normalt.

Vand og gødningsstoffer recirkuleres på samme måde i vertikale landbrug som moderne produktion i et væksthuse. For fødevarerproduktion i vertikale landbrug og væksthuse bruges i princip ikke kemiske pesticider, men naturlige biologisk bekæmpelse (rovinsekter mod specifikke skadedyr) anvendes i væksthuse. Udfordringen er dog, at man i mange vertikale landbrugssystemer dyrker mange arter og sorter men kun kan have én dyrkningstemperatur og fugtighed i et rum, som ikke nødvendigvis er optimal for hverken arter, sorter eller udviklingstrin (Fig. 1-4). Der er udviklet lodrette produktionssystemer i væksthuse til tropiske områder (Fig. 5) f.eks. Skygreens i Singapore, hvor planterne flyttes rundt i et højt væksthuse. Konceptet med planter, der bevæges rundt i væksthuse, har tidligere været brugt til stiklingeproduktion af vedbend (Multigreen, Odense). Der findes også vertikale landbrug, hvor planterne flyttes lodret (cubicfarms).

Antallet af potentielt rentable afgrøder produceret i vertikalt landbrug er i øjeblikket begrænset til hovedsageligt mikrogrønt, som kan produceres fra frø af næsten enhver afgrøde. Den spiselige del af mikrogrønt er skud med kimblade og første ægte blade som kan høstes, når kimbladene er fuldt udfoldet, og planten har en minimumshøjde på 5 cm. Mikrogrønt er værdsat af forbrugerne for deres udseende, smag og tekstur, og de kan have høje niveauer af potentielt sundhedsfremmende indholdsstoffer (Gerovac et al. 2016). Mikrogrønt hævdes at have et højere indhold af vitaminer, mineraler og bioaktive forbindelser sammenlignet med voksne planter (Gerovac et al. 2016). Mikrogrønt kan være en værdifuld næringsrig fødekilde i områder med vanskelig adgang til friske grøntsager. Det forudsætter dog en stabil el- og vandforsyning af høj kvalitet og en stabil forsyningskæde. Selvom mikrogrønt kan dyrkes i en række forskellige systemer, udenørs, i drivhus og under indendørs forhold, er dyrkning i kontrollerede miljøer med kunstig belysning en sikkerhed for kvalitet og fødevarerikkerhed. Ud over energiforbruget giver mængden af frø til mikrogrønt produktionen et stort CO₂ aftryk og en væsentlig driftsudgift.



Figur 1. Eksempel på pilot installation i fem lag med begrænset automatik (Aaralab, Portugal)
(Foto: Carl-Otto Ottosen)



Figur 2. Eksempel på delvis automatiseret lodret produktionssystem for salat og krydderurter i Ljusgårda
(Foto fra hjemmeside, <https://ljusgarda.se/>).



Figur 3. Eksempel på modul-opbyggede dyrkningssystem med en vis grad af automatik (<https://urbancropsolutions.com/>), der kan placeres efter behov i bygninger og lagerlokaler.



Figur 4. Vertikalt landbrug i væksthuse med mobile hylder i Singapore (<https://www.skygreens.com/>)



Figur 5. Eksempel på container dyrkningssystem med en vis grad af automatik (<https://urbancropsolutions.com/>), som placeres ved restauranter

1.2 Status for vertikalt landbrug i Europa

Væksten i antallet af vertikale landbrug skyldes hovedsageligt, udvikling i LED-belysningsteknologien og den store forbrugerefterspørgsel efter friske, sunde og lokale produkter. Det har især sin berettigelse i lande med stor befolkningstæthed og længere afstand til produktionen, men der har nu også været en stor indsats på markedsføring om fordele ved vertikalt landbrug i form af mindre vandforbrug, mindre gødning, ingen pesticider og mindre arealforbrug (jvf. Despommier), mens energiforbruget får en meget lille omtale. Faktisk er der stort set ingen omtale af energibruget på nogen af de forskellige firmaers hjemmesider, hverken omfang eller sammensætning af energikilderne (gas, el osv.) og status for mange er uklar (Butturini and Marcelis 2020).

Der er meget store forskelle i historikken mellem landene. I Japan har der altid været et marked for højværdiprodukter, der også kan koste ekstremt meget. Japan har et reelt problem med dyrkningsarealet, da en stor del af landet er bjerge og dermed ikke opdyrkeligt, så man har fokuseret på at udnytte det eksisterende areal med væksthuse og vertikalt landbrug. I USA er vertikalt landbrug udviklet først på østkysten pga. transportafstanden fra primært Californien og Mexico, men der er en stærk udvikling i det vestlige USA drevet af

tech industrien og klimacændringer og vandforsyning. I Singapore satser man på at blive mere selvforsynende med grønsager, så vertikalt landbrug er statsstøttet (Benke and Tomkins 2017).

Antallet og størrelsen af vertikale landbrugsbedrifter i Europa er på nuværende tidspunkt stadig ret lille i forhold til produktionskapaciteten i vækst, men i det senere årti har de oplevet en hurtig ekspansion (Butturini and Marcelis 2020). En oversigt over CEA-systemer med indrapporterede data fra firmaerne giver ikke indtryk af høj profitmargin eller ressourcebevidsthed, da mange firmaer ikke måler på ressourceforbruget (<https://www.agriteculture.com/census>). Problemet er, at mange startup virksomheder forsvinder hurtigt, fordi deres produktionskoncept ikke er økonomisk bæredygtigt eller ikke kan forsyne det forventede marked. Det kan minde en del om det cannabisboom, som man havde forventet i Danmark.

Internationalt startede mange firmer som producenter af fødevarer men har været igennem ofte (gentagne) konkurser o. lign. Eller for at citere (Butturini and Marcelis 2020): "The most profitable way of capitalizing on vertical farming technology has yet to be established". Og det er svært at se overskudsmuligheder, når etableringsomkostninger er høje og energiforbruget højt – også før den akutte og nuværende eksplosion i energipriser.

Mange firmaer har så vidt det kan bedømmes finansiering fra hedge- og investeringsfonde mv., hvilket ikke er almindeligt i planteproduktion, men nok skyldes ønsket om en "grøn profil". Forsyningsindustrien til vertikalt landbrug er også ekspanderet eksponentielt ofte drevet af firmaer, der startede med at producere planter, men så er skiftet til produktion af systemer. Udbuddet omfatter mange nystartede virksomheder samt etablerede forsyningsvirksomheder fra drivhusindustrien indenfor klimastyring og lampeproduktion.

Omkostningseffektiviteten, skalerbarheden og den miljømæssige bæredygtighed af intensivt vertikalt landbrug er usikker (Benis and Ferrão 2018). Den initiale investering pr. kvadratmeter for et vertikalt landbrug kan være op til 10 gange højere end for et højteknologisk drivhus, og de samlede driftsomkostninger pr. kvadratmeter mellem to en halv til fem gange højere end for et drivhus (Rabobank 2018). Kostprisen skønnedes i 2018 at være dobbelt så høj som for salat dyrket i et hollandsk drivhus. Da kostprisen for produkter fra vertikalt landbrug er relativt høj, skal merværdien af vertikale landbrugsprodukter også være høj for at være omkostningseffektiv.

'Pitchen' for vertikalt landbrug, der motiverer merudgiften, er et bedre produkt (bedre eller mere ensartet kvalitet, fri for kemiske midler, friskhed, smag, ernæringsmæssig værdi osv.). Udfordringer er dog, at produktionen er meget energitung og produktionen af 1 kg tørvægt af salat kræver 247 kWh på et vertikalt landbrug, sammenlignet med 70, 111, 182 og 211 kWh i drivhuse i henholdsvis Holland, to i Sverige (uden og med kunstlys) og De Forenede Arabiske Emirater (Graamans et al. 2018), afhængigt af en kombination af det naturlige dagslys og varmetilførslen fra solen, der kræver opvarmning eller køling.

Vertikale landbrugsvirksomheder sælger ofte deres grøntsager til en overpris, i nogle tilfælde på linje med markedspriserne på økologiske produkter (Benis and Ferrão 2018) Blandt danske startups har der været

ønske om at kunne kaldes økologiske (2.0) da de dyrkes uden pesticider og mere bæredygtigt end økologisk produktion (<https://www.altinget.dk/foedevarer/artikel/di-foedevarer-fremtidens-oekologi-skal-vare-hoejteknologisk>). I modsætning til i USA kan jordfrit dyrkede afgrøder dog ikke certificeres som økologiske i Det Europæiske Fællesskab (European Commission, 2008; OTA, 2019), da det europæiske økologimærke er baseret på bevarelse af en sund næringsbalance i jord. I praksis godkendes dyrkning i organiske medier i potter i væksthuse som økologisk, men ikke i vandkultur forudsat planternes sælges i potter. For spirede frø og småplanter (mikrogreens) kan dyrkning ske i organiske medier (hamp, kokos) (Se landbrugsstyrelsens økologivejledning).

Allerede før vertikalt landbrug var under udvikling har der været forskning i kontrolleret produktion bl.a., med fokus på fødevarerproduktion på rumrejser (Wamelink et al. 2014), som den eksisterende væksthusegartnerindustri også nyder godt af. De mange forsøg i lukkede systemer kan ikke direkte overføres til væksthuse eller vertikal produktion, fordi de er meget specifikke f.eks. hvad gælder lyskilder, lyssammensætning og bygningens isolerings- og tæthedsrad.

Væksthusegrøntsagsproducenter har et tæt samarbejde med fødevareredistributører og er højeffektive operatører. Derfor er de i direkte konkurrence med vertikale landbrug. Det gælder især i regioner eller lande med en høj koncentration af drivhuse, såsom Holland eller Danmark, hvor transportafstanden til markedet er lille. De større gartnerier og vertikale landbrug leverer til supermarkedskæderne og fordeles via deres distributionskæder, så transportafstande og leveranceforhold adskiller sig ikke mellem store vertikale landbrug og gartnerier.

Hovedprodukttypen i vertikalt landbrug er i høj grad planter med høj turnover, dvs. småplanter, der kan udnyttes i en kompakt multilagsproduktion – oftest samlet i begreberne baby leaf og mikrogrønt. Det kan i princippet høstes få uger efter såning, og en stor del af plantenæringen stammer fra frøet. Der er et marked for friske, funktionelle fødevarer, pga. forbrugernes stigende interesse for ændret diæt og nye typer mad. Der er et enormt potentiale for at tilpasse produktionen af bladgrøntsager til både lille og stor skala og i princippet forbedre ernæringsværdien i menneskers kost. Mængden af mikrogrønt i kosten i forhold til andre fødevarer er dog lille og bidrager ikke i væsentlig grad med proteiner og kulhydrater. Selv om det på papiret er en let produktion, der ikke kan laves på friland, så er der mange udfordringer m.h.t. valg af plantemateriale, gødning/vanding og det optimale stadie for høst dvs. afgrødens fysiologi og kvalitet, men i lige så høj grad håndtering, pakning, transport og anvendelse efter høst. En stor aktør på det hollandske marked Koppert Cress forædler og producerer karse og vandkarse sorter til professionelle køkkener, men har valgt at producere i væksthuse pga. udgifterne (<https://www.koppertcress.com/en>).

Vertikalt landbrug er en ny industri, og det kan hævdes, at implementering af et vertikalt landbrugsprojekt falder mellem flere stole omkring fødevarer sikkerhed, bygningsreglement og dermed også regelsæt for landbrug, næring og vandforbrug mv, men i princippet adskiller produktionen sig ikke fra moderne væksthuse og de regler der gælder der.

I Holland er regionen Westland kendt for sin høje koncentration af drivhuse, så det kan forklare mange konkurser blandt nye vertikale landbrug, da de ikke har været konkurrencedygtige. Future Crops, (<https://www.future-crops.com/>) nævner, at de har udstrakt brug af automatisering, og får en del af sit energibehov fra 16.000 solpaneler installeret på taget og har 8000 m² potentielt dyrkningsareal, men som med mange andre hjemmesider er status for produktionen uklar. I Danmark er Nordic Harvest og Infarm de store aktører til flerlagsproduktion, mens man i Sverige har firmaet Ljusgårda (<https://ljusgarda.se/>) med et lodret produktionskoncept og er faktisk placeret forholdsvis langt fra de større byer. Infarm startede sit produktionskoncept med in store produktion, men udvikler også multilagsproduktion nu. Et eksempel på en et lags produktion i mere lukkede væksthuse med stort regionalt marked er Norrgrönt med økologisk produktion i Hällnäs Handelsträdgård i det nordlige Sverige (<https://www.hallnas.nu/>).

Brugen af vertikalt landbrug kan specielt være vellykket, når det bruges til dyrkning af kun en del af en (højværdi)afgrødes livscyklus. Gartneriet Bevelander (<http://www.tuinderijbevelander.nl/>) producerer purløg året rundt. Purløget dyrkes på marken det første år, og løgene høstes om efteråret. Efter en køleperiode på 3 måneder bruges et flerlagssystem til at drive planterne til salg på kort tid. Adskillige tulipanproducenter bruger vertikale landbrugsløsninger til drivning af løgene. Vitro Plus har 75% af markedsandelen af den globale bregneindustri og producerer og sælger bregner fra vævskultur produceret i et flerlagssystem udstyret med LED-belysning. Mikroformering af planter i reagensglas i lag er faktisk en almindelig og veletableret praksis for formering af unge planter, især pryddplanter. For omfattende gennemgang af vertikal landbrug se (Butturini and Marcelis 2020). Oversigterne viser også at det er svært at skabe et løbende overblik i det dynamiske miljø med vertikale landbrug entreprenører, hvor man har svært ved at se hvilket stadie et givent projekt er på. Dvs. at det kan være uklart om en pressemeddelelse refererer til en projektidé eller om det er en fungerende produktionsenhed. Litteraturen afspejler det også, da mange artikler bygger på teoretiske modeller for f.eks. plantevækst eller energiforbrug (Zhang et al. 2018, Avgoustaki and Xydis 2020, Delorme and Santini 2022).

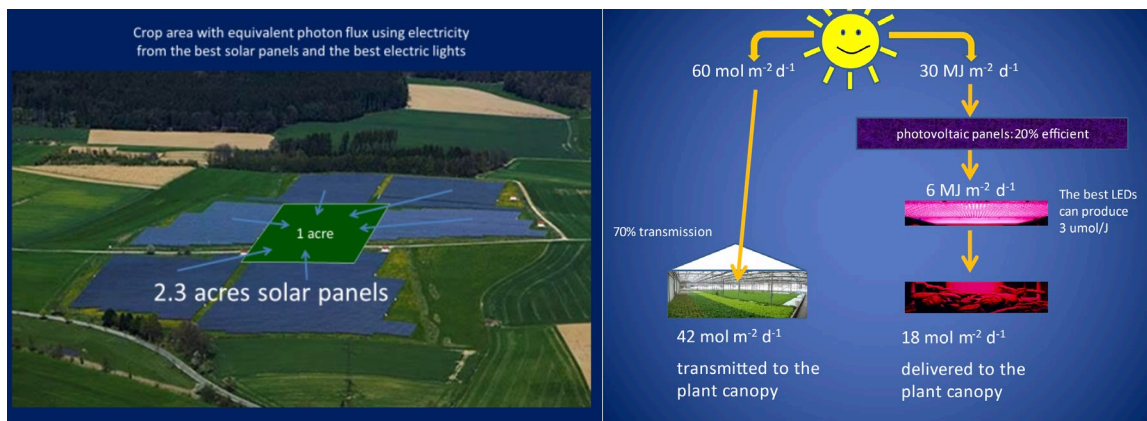
Ressourceforbrug og relaterede problematikker i vertikalt landbrug

1.3 Energi

Den danske model for reduktion af energiforbrug har fokuseret på at mindske energiforbruget per m², da det altid har været et politisk krav til erhvervet ifm. aftaler med energistyrelsen, så det er udgangspunkt for denne rapport analyse.

Det er svært at skaffe robuste informationer omkring vertikale landbrugs energiforbrug endsiige hvordan deres energiforsyning er sammensat med hensyn til energikilder (gas, el, vedvarende energi osv.). Oprindelsen af energien er i princippet også ligegyldigt på nuværende tidspunkt, fordi man må fokusere på det samlede energiforbrug i en produktion, hvis man skal sammenligne produktion af planter. I vores tidligere forskning har vi set, at man sagtens kan øge produktionen med øget ressourceinput, men også at man kan optimere produktivitet per m² og få mindre ressourceforbrug per produceret enhed, hvis man konstruktivt udnytter den frie energi fra solen (Qu et al. 2021).

Det er i dag teoretisk muligt at omlægge en væksthushproduktion til en energiforsyning på udelukkede el og dermed i princippet have en grøn produktion med vedvarende energikilder (Naseer et al. 2022). Vi er på nuværende tidspunkt ikke i stand til at erstatte de fossile energikilder med vedvarende energikilder. Når mange vertikale landbrug promoverer sig ved at frigøre landbrugsarealer pga. den effektive produktion på lille areal, så skal man dog huske på, at når det sker med vedvarende energi fra solen, så kræver det store arealer med solpaneler og de fleste solpaneler placeres på landbrugsjord. Det er tankevækkende, bruger man af solpaneler til at skaffe energi til (LED) belysning til plantedyrkning i CEA kræver det 2.3 gange dyrkningsarealet (fig. 6A). Som et eksempel CEA med et dyrkningsareal på 1 ha skal bruge 2.5 ha solceller for at skaffe et relativt lavt lysniveau. Lysmængden varierer med året og behovet for lys i produktionsarealet. Selv med mere effektive solpaneler og LED lamper i fremtiden er energitabet ganske stort i forhold til udnyttelse af naturligt lys. (fig. 6B). Solpaneler på bygningerne rækker ikke så langt og det er ganske store arealer, der skal trækkes ud af markdrift for at skaffe strøm nok. Vindenergi er nok en mere realistisk løsning til at skaffe vedvarende energi.



Figur 6A. Arealbehov for solpaneler til belysning i CEA og **6B:** Energioverførsel til væksthuse eller vertikale landbrug fra sol til planter med de nuværende solpaneler og LEDs effektivitet (<https://www.youtube.com/watch?v=QBex3KZJYLQ>, med tilladelse fra Bruce Bugbee).

En høj lysudnyttelseseffektivitet (LUE, g mol^{-1}), defineret som hvor meget biomasse, der kan produceres ved en given lys sum (daglig lysintegral, DLI, $\text{mol (fotoner) m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$), er afgørende for økonomien i produktionen i vertikalt landbrug. Meget forskellige værdier for LUE er blevet rapporteret i litteraturen, og det er ikke klart, om LUE som sådan er højere i vertikalt landbrug end i drivhus- eller frilandsdyrkning. Værdier af LUE af salat dyrket i vertikale landbrug, drivhus og på mark er analyseret (Jin et al. 2022). Den gennemsnitlige LUE for salat dyrket i et vertikalt landbrug var $0,55 \text{ g mol}^{-1}$, sammenlignet med $0,39 \text{ g mol}^{-1}$ for drivhusdyrket salat og $0,23 \text{ g mol}^{-1}$ for markdyrket. Den maksimalt målte LUE for salat dyrket i et vertikalt landbrug ($1,63 \text{ g mol}^{-1}$) er tæt på den teoretisk maksimale værdi, som spænder fra $1,26$ til $1,81 \text{ g mol}^{-1}$.

Da alle miljøfaktorer teoretisk set kan kontrolleres fuldt ud, kan vertikale landbrug nærme sig den teoretiske maksimale LUE, men som tidligere nævnt er optimal sjældent lig med økonomisk rentabelt og ikke energimæssigt bæredygtigt. Den højeste LUE får man ved lavt lys (på samme måde som en bil der er mere effektiv og bruger mindre brændstof per kilometer ved langsom bykørsel, sammenlignet med hurtig kørsel på motorvej), men en høj LUE ved lavt lys kan stadigvæk give mindre total vækst end en lavere LUE ved højt lys.

Ved at bruge den højeste rapporterede LUE baseret på skudfriskvægt (44 g mol^{-1} ved $200 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ PAR og 16 timers fotoperiode), anslås det, at hvert lag af en vertikal farm potentielt kan producere op til 700 kg årligt af salat pr. m^2 ved $500 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ kontinuerligt lys. Men i mange plantearter er 24 timers lys ikke muligt, da det giver bladskader og reduceret kvalitet (Haque et al. 2015) og $500 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ PAR er meget energikrævende at forsyne med kunstlys.

På trods af at vertikale landbrugsvirksomheder på deres hjemmesider hævder at være miljøvenlige (mindre arealanvendelse, mindre brug af kemi og vand i forhold til markdyrkning), er den faktiske bæredygtighed af vertikale landbrug begrænset, mest fordi energiforbruget og dermed CO_2 aftrykket er meget højere end den for Nordeuropa sammenlignelige væksthushproduktion (Orsini et al. 2020, Blom et al. 2022). Faktisk

er vertikale landbrug mere energikrævende end drivhuse i alle klimazoner. Energiforbruget for åbne væksthuse er væsentligt lavere end de to andre systemer, selv i mere ekstremt klima, hvilket skyldes muligheden for at optimere styringen i forhold til omgivelserne, primært indstrålingen fra solen der giver gratis varme og lys. Generelt kan siges, at jo mere man tillader svingninger i klimaet i et væksthus på plantens præmisser, jo mindre energi bruges for opvarmningen (Aaslyng et al. 2003).

Det mest relevante for at forbedre energieffektivitet er at bruge få plantearter med ensartede klimakrav (for hver klimazone/temperaturkrav) og at reducere lysniveauet (og dermed energiforbruget) på døgnbasis mv. (Weidner et al. 2021). Netop valg af lysintensitet og spektralsammensætning har stor betydning for energiforbruget og planteproduktionen. Med optimal gødningssammensætning er det i princippet lyssummen der afgør, hvor meget planten kan vokse, ikke kun lysniveauet i PAR, da daglængden gør en stor forskel for DLI. Der findes dog undersøgelser, der tyder på, at den samme lys sum per døgn fordelt på flere timer af lavere PAR, øger tilvæksten i salat og mizuma (en sort af raps) (Palmer and van Iersel 2020), eftersom LUE er højest ved lavt lys.

Et review (Appolloni et al. 2021) analyserede virkningerne af LED-belysningsopskrifter til lukket produktion på metabolitsammensætning i forskellige grupper af afgrøder (medicinske og aromatiske planter, mikrog-rønt og spiselige blomster). Fokus var på indholdet af anthocyaniner, carotenoider, fenoler, tocopheroler, glycosider og terpener, som viste en meget stor variation, fordi planterne blev dyrket under vidt forskellige forhold i de fleste forsøg.

De fleste undersøgelser anvendte en kombination af rødt og blått lys (20/80 %) med 16 timers dag og PAR større end 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ se f.eks. Azad et al. (2020). Et problem er, at artiklerne typisk angiver den forventede værdi af lamperne og ikke altid den specifikke spektralsammensætning og lysfordeling. Desværre kan der ofte være store afvigelser i forsøgene afhængigt af forsøgsopsætningen ligesom man må forvente i et kommercielt væksthus eller vertikalt landbrug.

LED spektre var effektive til at påvirke indholdet af specifikke metabolitter, selvom der blev observeret store variationer, afhængigt af undersøgte art/sort og metabolit (Wong et al. 2020, Appolloni et al. 2021) og begge disse artikler rummer gode oversigter af det komplicerede samspil mellem lys, arter og mulige metabolitter. Den overordnede konklusion er, at der ikke findes nogle simple eller universelle regler for, hvordan spektralfordelingen skal kombineres med DLI for optimal plantevækst.

Lysbehandlinger mod slutningen af produktionen kan påvirke kvaliteten af afgrøden efter høst. I sidste fase af produktionen fik salat forskellige lysniveauer med enten LED eller HPS-lamper i en uges tid. Højere lysintensiteter øgede tørstofprocenten og indholdet af askorbinsyre og kulhydrater ved høst og holdbarheden blev forlænget (Min et al. 2021).

Mikrogrønt har typisk en høj lysudnyttelse fordi det meste af bladarealet bliver eksponeret for lys, så effekten af styret lyssammensætning er større end for planter med flere bladlag men tilvæksthastigheden falder når

planterne får flere bladlag, der skygger for hinanden. I et forsøg med basilikum, kål, grønkål og kålrabi tilføjede man UV-A og langrødt-lys til hvide LED'er. Sammenlignet med hvide LED'er påvirkede tilsætning af UV-A i hele vækstperioden planten ved at langrød gav mindre biomasse og øgede plantehøjden med 9-18% – altså ingen positiv effekt (Hooks et al. 2022).

Planters reaktion på forskellige bølgelængder uden for det normale fotosynteseaktive lysspektrum (PAR), nemlig langrødt og UV, tyder på at meget betydelige påvirkninger i planter er mulige for både at øge produktiviteten, plantevækst og indholdsstoffer (Wang and Folta 2013, Palma et al. 2020, Zhen and Bugbee 2020, Palma et al. 2021).

En meta-analyse er gennemført for at vurdere virkningerne af forskellige farver af LED-lys på plantevækst, udvikling og forskellige egenskaber (Ma et al. 2021). Ikke overraskende var effekten af LED på plantevækst og kvalitetsegenskaber artsspecifik, og effekten var påvirket af dyrkningsbetingelserne. Forfatterne konkluderer, at der savnes mere målrettede forsøg i praktisk produktion, især relateret til kvaliteten af produktet, såsom indholdet af carotenoider, anthocyaniner og andre antioxidantforbindelser.

1.4 Vand, gødning og sprøjtemidler

En af de vigtige faktorer i vertikalt landbrug er styring af mængden af næringsstoffer i gødningsvandet, som måles som elektrisk ledningsevne (EC). Det optimale EC er vigtigt for at forbedre vækst og mindske spild i de vertikale landbrug (Tsukagoshi and Shinohara 2020). Der er grundlæggende ikke lavet så mange undersøgelser om gødning specifikt til vertikalt landbrug. I væksthuse blandes typisk forskellige stamgødninger med rå- eller regnvand og en syre til en ønsket elektrisk ledningsevne og pH som tilpasses til forskellige plantearter og udviklingsstadier. I en undersøgelse så man på effekten af forskellige EC-niveauer (0,5-2,0 dS m⁻¹) med en standard næringsopløsning på væksten og udviklingen af basilikum og salat sorter (Hosseini et al. 2021). Man brugte en konstant temperatur, relativ lav luftfugtighed på 50-60 %, men højt lys (215 ± 5,5 μmol m⁻² s⁻¹). I modsætning til andre undersøgelser med højere EC var den bedste tilvækst her EC på 1,2 og 0,9 dS m⁻¹, men det høje EC øgede mængden af kvælstof i bladene, hvilket kan give risiko for et for højt nitratinhold.

I vertikale dyrkningssystemer får man oftest et meget højt bladareal indeks (bladareal per gulvareal, LAI). I væksthuse, hvor man dyrker i et plantelag, affugtes luften som oftest ved at man ventilerer og hæver lufttemperaturen, hvilket transporterer fugten ud fra væksthuset ved konvektion. Uden en aktiv luftomrøring og affugtning i vertikale dyrkningssystemer, med mange plantelag, bliver luftfugtigheden meget høj (> 80% RH). Ved konstant høj luftfugtighed reagerer mange plantearter ved at reguleringen af spalteåbningerne svækkes, mens lavere fugtighed aktiverer spalteåbningerne (Fanourakis et al. 2019) For høj fugtighed giver en dårligere holdbarhed, da spalteåbningerne ikke lukker, så bladene taber vand.

Nogle næringsstoffer transporteres gennem planten vha. transpirationsstrømmen, når vand fordamper fra bladene. Et af disse næringsstoffer er kalcium. Høj luftfugtighed mindsker transpirationen og kan resultere i

reduceret optagelse og transport af calcium. Det betyder, at afgrøder som salat kan man få såkaldt tipburn (svidninger i bladspidserne) pga. calcium-mangel. Det er specielt vigtigt for vertikalt landbrug at bruge (salat)sorter, der er modstandsdygtige over for tipburn. Bladgødsning med calcium er en effektiv forebyggende foranstaltning men er svær at udføre i vertikalt landbrug pga. ofte begrænset fysisk adgang til hylterne. Det er også vigtigt at regulere tilvæksten til en vis grad, fordi tipburn ofte opstår under det optimale miljø for plantevækst. Løsningen er at undgå de klimaforhold, hvorunder tipburn opstår (Maruo and Johkan 2020).

I vertikale landbrug er det stort set umuligt at bruge svampe- og insektmidler både af sikkerhedsmæssige årsager men også pga. den korte produktionstid. Det betyder i praksis, at der er en vis risiko for sygdomsudvikling for eksempel i gråskimmel og meldug, hvis fugtstyringen ikke er optimal eller hvis vindhastighed og fugtniveauet svinger for meget. Situationen er i princippet den samme i væksthushproduktion af salat og krydderurter, men i de kritiske perioder kan man i væksthush aktivt regulere fugten med opvarmning og ventilation.

1.5 Samlet CO₂-aftryk

Data fra Orsini et al. (2020) er baseret på en række forskellige produktionssystemer, men hovedbudskabet svarer meget godt til en ny LCA analyse i Holland (Blom et al. 2022). Der sammenlignede man det nuværende CO₂ aftryk for salat produceret i et konkret vertikalt landbrug sammenlignede med konventionelt landbrug i mark samt både jordbaseret og hydroponisk drivhusdyrkning (Blom et al. 2022). Vurderingen omfattede livscyklus fra vugge til grav. CO₂-aftrykket for det vertikale landbrug var 5,6-16,7 gange større end for de konventionelle landbrugsmetoder. Der er uden tvivl meget store forskelle i energiforbruget mellem forskellige vertikale landbrugssystemer, men det er ikke evalueret uafhængigt (se f.eks. <https://cubicfarms.com/how-cubicfarms-uses-54-62-less-energy-than-typical-vertical-farms/>).

Samme forfattere har regnet på energiudnyttelsen dvs., hvor meget energi skal der bruges til at producere en given plantemasse. Det er klart, at ressourceforbruget i marken er meget lavere end væksthuse, men når man ser på det samlede energiforbrug (altså hvor meget plantemasse der produceres per kilo CO₂), så er vertikalt landbrug en absolut højdespringer med mindst 3 gange højere CO₂ aftryk end væksthuse (Tabel 3). Det er en generel analyse, som afhænger af produktionssystem, klima mv, men trenden er klar i andre publicerede analyser omkring ressourceforbrug i vertikalt landbrug (Graamans et al. 2018, Blom et al. 2022).

Tabel 3. Arealudnyttelseseffektivitet, energiudnyttelseseffektivitet og CO₂ aftryk for salat i forskellige produktionssystemer fra friland til vertikalt landbrug (Orsini et al. 2020).

Type	Areal udnyttelses effektivitet (g/friskvægt/m ² /dag)			Energiudnyttelses effektivitet (g/friskvægt/kWh)			CO ₂ aftryk (kg CO ₂ /kg FW)		
	Mark	Væksthus	PFAL	Mark	Væksthus	PFAL	Mark	Væksthus	PFAL
Salat	10-15	100-300	300-1300	1000-3000	30-190	1-140	0,01-0,38	0,21-3,15	10-25

Energibehovet til lys i den vertikale landbrug er 70-85 % af CO₂-fodafttrykket, så en betydelig reduktion i energiforbruget er påkrævet for at konkurrere med væksthuse ud fra et CO₂-aftryksperspektiv (Weidner et al. 2021, Blom et al. 2022).

En undersøgelse i Grækenland sammenlignede produktion af salat i vandkultur i væksthuse og vertikalt landbrug. Man undersøgte højt og lavt lysniveau i en vertikal farm med lavt niveau af kunstlys og naturligt lys i væksthuse. Den højeste biomasse blev registreret i højt lysniveau. Nettofotosyntesen var højest i højt lys, men væksthuset havde lavere energiforbrug og planterne havde en bedre stresstolerance (Voutsinos et al. 2021). For Sydeuropa, der har noget højere lysniveau, kan man overveje muligheden for at anvende sol-

panelser både i væksthuse og vertikale landbrug, der uden invertere driver LED lamper i vertikal planteproduktion i lysperioden (Savvas et al. 2020) og dermed reducerer energitab i lyskonvertering. Lampetyperne er dog så vidt vides ikke i kommerciel produktion.

1.6 Automatisering

På grund af høje lønomkostninger, knaphed på kvalificeret arbejdskraft og behovet for høj effektivitet, er der en stærk efterspørgsel efter automatisering i CEA. De simple hyldesystemer (se Fig. 1) kræver meget manuelt arbejde pga. designet, men på den anden side er investeringsudgifterne mindre. Andre skalerbare modulsystemer med mobile bakker mindsker arbejdskraftbehovet (Fig 2). Arbejdskraft udgør en stor del af de samlede produktionsomkostninger i CEA. I væksthuse og i vertikale landbrug er der udviklet en række teknologiske løsninger til sortering, flytning og pakning af planter. På trods af faste og driftsmæssige omkostninger kan robotter udføre forskellige opgaver effektivt, konsekvent og med høj præcision og kan anvendes på alle trin af produktionen og efter høst.

Modeller for klimastyring og beslutningsstøtte målrettet til vertikalt landbrug er ikke nævnt i litteraturen. Computermodeller, som kan være mekanistiske (videns-baserede, ved hjælp af nøgleprocesser, der er kendt for at bestemme plantevækst) eller datadrevne (anvendelse af maskinlæringsteknikker til at udlede mønstre i dataene) er på vej i væksthuse. I danske projekter arbejdes med digital twins til forbedring af styring af klima, plante-flow osv. i væksthuse for at optimere ressourceforbrug og styre væksten til salg on time.

1.7 Bæredygtighed

Man kan ikke betegne vertikalt landbrug i Danmark som værende et bæredygtigt alternativ til traditionelle produktionsformer. Selvom arealudnyttelsen i vertikale landbrug er meget effektiv (se Tabel 3 baseret på Orsini et al., 2020), simpelthen fordi man kan dyrke mange lag på samme areal og det kan foregå i kontrollerede klimaforhold, er energiforbruget stadig meget højt. I de fleste situationer forsyner vertikal landbrugsproduktion hovedsageligt de (begrænsede) markeder, der efterspørger højkvalitetsafgrøder som ellers er produceret i drivhuse, såsom friske bladgrøntsager og urter og på kortere sigt måske jordbær.

Isoleret kan man sige, at man kan anvende vertikalt landbrug i områder, hvor der er kritisk adgang til frugtbar landbrugsjord og vand, typisk i megacities som i de store tropiske byer, hvor infrastrukturen for fødevarertransport er svag. Højteknologiske løsninger for planteproduktion vil dog også være følsomme for forstyrrelser og vil kræve stabil vand- og elforsyning af høj kvalitet. Prisen for den producerede fødevarer gør dog, at det næppe har nogen effekt på fødevarerituationen for en stor del af befolkningen, som ikke vil have økonomi til at købe dyrere grøntsager, så der er også behov for mere simple teknologier til at forsyne f.eks. slumområder i både I- og U-lande.

Produktion i vertikalt landbrug kræver mere energitilførsel end væksthuse, som igen har mere forbrug end frilandsproduktion. Der er for øjeblikket ikke eksempler på at vertikale landbrug (økonomisk) kan bruges til at producere basisfødevarer, som dyrkes på marker, (protein/kulhydrater) selvom det selvfølgelig teknisk set er muligt (Asseng et al. 2004, Monostori et al. 2018).

Det lukkede miljø i vertikalt landbrug reducerer risiko for miljøforurening i bredeste forstand men ikke i forhold til væksthuse. Et forhold som specielt har været et problem i Holland med mange gartnerier, er lysforurening og påvirkning af biodiversitet i drivhusområder, men i praksis er de problemer løst via lovgivning om lystænding og tætte gardiner.

I lukkede systemer med avancerede køle/ventilation/air con (HVAC) er der mulighed for at opsamle vand fra affugtning, hvilket gør det muligt at genbruge transpireret vand samt den energi, som det indeholder. Det er dog en forholdsvis dyr løsning, fordi man skal have en meget høj kapacitet til køling/ventilation. I det tilfælde kan vand kun forlade en vertikal farm som en del af det høstede produkt, hvilket ville reducere vandforbruget med 90% sammenlignet med åben mark, mens reduktionen i forhold til væksthuse er noget lavere. Det skal dog bemærkes, at de fleste væksthusegartnerier indsamler regnvand til deres vanding, mens vertikale landbrug bruger postevand.

Vertikale landbrug er dog ikke unikke i deres potentiale for vandgenanvendelse, da lukkede drivhuse med aktiv køling kan opnå tilsvarende effektivitet. Gødning recirkuleres i de fleste væksthuseproduktioner så næringstab er normalt marginalt, så forskellene i gødningsforbrug mellem åbne og lukkede væksthuse og vertikalt landbrug er marginalt. Der vil altid ske en vis kassation af gødningsvand mellem produktionsserier, hvis gødningssammensætningen ikke er til at genoprette i gødningsblanderne. Rensning og desinfektion skulle teoretisk give mulighed for næsten ubegrænset genbrug af næringsopløsninger. I dette tilfælde ville kun gødningen i selve afgrøden forlade produktionen og gødningseffektiviteten ville nærme sig 100 %.

Man kan reducere næringsstofforbruget i væksthuse og vertikalt landbrug ved at udnytte grønt affald fra produktionen. Det kan ske via kompostering af plantemateriale, f.eks. til brug i dyrkningssubstrater. Det er dog ikke realistisk at udnytte side strømme i form af grønt (have)affald eller gråt vand til fødevarerproduktionen i vertikalt landbrug både pga. variation i sammensætningen over året. Fra et sundhedsmæssigt synspunkt hindrer potentielle kontamineringer med lægemidler, toksiner (f.eks. tungmetaller) brug af sådanne affaldsstrømme til fødevarerproduktion.

Teknologitilskudsordningen og vertikal farming

Tabel 5. Status over ressourceforbrug i forskellige CEA-systemer.

Type	Væksthus	Kombineret væksthus og vertikalt landbrug	Vertikalt landbrug
Omkostninger til installation	Høje	Høje	Meget høje
Energiforbrug og driftsudgifter	Højt, men regulerbart og varierer over året	Højt regulerbart og varierer over året	Meget højt, kun i begrænset omfang regulerbart, da der ikke indgår naturligt lys
Teknologi niveau	Højt, baseret på standard systemer	Højt	Begrænset antal systemløsninger
Krav til nødvendig personale ekspertise til management og styring	Høj	Høj	Meget høj
Vandforbrug og -tab	Lavt	Lavt	Lavt
Næringsforbrug	Medium	Medium	Medium
Energieffektivitet	Medium	Medium	Højt
Energiforbrug	Medium	Medium	Meget højt
Næring	Recirkuleres	Recirkuleres	Recirkuleres
Arealudnyttelse	Medium	Medium til høj	Højt
Lokalisering	Lokalt til regionalt	Lokalt til regionalt	Lokalt til regionalt
Transport (typisk til distributionscentre for supermarkeder)	Lokalt i DK	Lokalt i DK	Lokalt i DK (for små enheder lokalt i byen)
Robusthed (følsomhed for pris, klima og ressourcer og sygdomsproblemer)	Moderat	Medium	Højt pga. prislefølsomhed
Dansk knowhow til installation	På væksthushus og teknik	På væksthushus og teknik	Kun på lamper

I miljøteknologiordningen er vertikal landbrugsproduktion ikke nævnt specifikt, men normalt er der en opdeling af alle landbrugsproduktioner i 1. gødning/vanding, 2. pesticider og 3. energi. Målet med tilskud er at sikre en mindre miljøbelastning i bredeste forstand, men det er en række minimumskrav som angivet i bekendtgørelserne.

I forhold til miljøteknologiordningerne er status for vertikale landbrug ikke nødvendigvis særligt klare og ikke direkte omfattet af formuleringerne omkring typer af virksomheder, der er tilskudsberettiget. Men sammenfattende er der i princippet muligheder for investeringsstøtte i vertikalt landbrug med udgangspunkt i den nuværende praksis mht. tilskudsordninger til investeringer.

Gødning/vanding: For vertikale landbrug er der ingen åbenlyse besparelser, da systemerne er lukkede og dermed potentielt uden tab. Bedre styringssystemer til gødning og vanding kunne anvendes til at optimere

produktionen. Disse gødningsanlæg vil normalt bestå af computerstyring and gødningsblandere med sensorer, mindre tanke til stamopløsninger og større vandtanke til returvand og evt. systemer til rensning af vandet inden det genbruges. Normalt anvender man sensorer for pH og saltindhold, men andre sensorer for gødningsstoffer specielt kvælstof (N) kan være et vigtigt styringsværktøj for at reducere nitratindholdet i blade.

Pesticider: anvendes ikke i vertikalt landbrug, så det er ikke relevant

Energi: For at opnå tilskud til investeringer til energibesparende foranstaltninger er udfordringen, at der mangler uafhængige informationer om det aktuelle energiforbrug. Dermed kan man ikke beregne den potentielle reduktionen ved brug af klimastyring eller installationer for at reducere energiforbruget. De installerede lamper er nyere LED-typer, så umiddelbart kan man ikke opnå nogen energireduktion ved at skifte lamper. Installation af varmepumper for at styre fugtigheden kan være af betydning for energiforbruget. Ved en kombination af ressourceoptimering og bedre produktivitet kan man måske opnå ressourcebesparelse og mindre svind ved at kombinere formeringsfasen af planter i vertikale systemer med en færdigproduktion i drivhus.

Perspektiver for forskning og udvikling i vertikalt landbrug

Der er et klart behov for som en første prioritet at reducere driftsomkostninger og CO₂ aftrykket i vertikalt landbrug, som man har gjort i væksthuse. Det skal reduceres ved brug af vedvarende energi, men det samme kan ske for en væksthushproduktion. Derfor skal der ske en større reduktion i ressourceforbruget i vertikalt landbrug i forhold til væksthushproduktion eller der skal udvikles flere højværdiprodukter. Den viden, der findes fra forskningen i klima i Danmark, har haft fokus på mere dynamisk udnyttelse af både variationer i lys og temperatur for eksempel koblet til det variable prismønster i elpriser. At tilføre mere energi (lys/varme) kan i princippet optimere produktionen, men dansk forskning har udnyttet viden om fysiologien til at optimere væksten med reduceret energiforbrug. Det er udviklet IT-værktøj, som kan bruges i praksis i forhold til de eksisterende kommercielle klimastyringscomputere. I lyset af de komplekse forhold i vertikale landbrug er der behov for at kombinere den biologiske og klimamæssige viden f.eks. via kunstig intelligens eller digitale twins.

Desuden er der jo i skrivende stund ikke noget videre overskud af energi på markedet selvom man i en 5-10-årig periode må forvente et større adgang til vedvarende energikilder. Der vil dog være en generel efterspørgsel på el til transport (elbiler), opvarmning (varmepumper) som kan påvirke prislejet.

Udviklingen i optimering af LED stiger meget langsomt og prisen er faldet relativt lidt per lysudbytte og udskiftning af lamper er ikke rentabelt. Fokus bør nok i høj grad være på en bedre udnyttelse af lysinstallationen, som resulterer i omkostningsreduktion, da de samtidig reducerer energiforbruget til belysning og køling. Udviklingen inden for online plantesensorer kan understøtte produktionssystemernes optimering, men med tanke på hvor få avancerede sensorer der i brugt i væksthuse, så er det endnu mere kompliceret at lave et sensorsystem med mindre planter passerer en "måle" station med tilvækst- (RGB) eller fysiologiske målinger med faste intervaller. I væksthuse kan man måske placere systemer på vandingsbomme, men det er en større udfordring i lag.

Retningen for fremtidig forskning er også for mikrøgrønt at reduceret energiforbrug ved at standardisere og forkorte produktionscyklussen kombineret med afgrødespecifik viden om samspillet mellem udbytte og kvalitet. Måltrettet brug af lysniveau og -spektrum kan fremme indholdsstoffer. Det er også et område med mange muligheder for underudnyttede afgrøder og vilde spiselige planter.

Dyrkning i hydroponisk og aeroponics sikrer, at vand og næringsstoffer er let tilgængelig for rødderne. Et lille rodsystem er optimalt, da det tillader planten at investere mere i skudbiomasse i et vertikalt landbrug, men der er dog ofte en balance mellem top og rod. Styring af rodzonetemperatur og iltniveau kan være med til at optimere optagelse af vand- og næringsstoffer. Yderligere forståelse af temperaturens betydning for rodfunktion kan bidrage til at forbedre planteproduktivitet og kvalitet, men det kan – på samme måde

som klimaet over jorden i et stort væksthuse – være en udfordring i store vertikale landbrug. En bedre forståelse af næringsforsyningen kan bruges til at mindske nitratindehold eller sikre planter med højere indhold af kritiske mineraler (selen, jern, zink og mangan, men valg af genotyper er også af stor betydning).

Det lukkede klima og et lavt sygdomstryk i vertikalt landbrug giver mulighed for introduktion af nye fødevarer afgrøder eller farmaceutiske afgrøder eller genindførelse af glemte eller mindre kendte afgrøder, der er svære at dyrke i væksthuse for at betjene nichemarkeder.

Forskellige metabolitter (og kombinationer) anses for at være nøglekilden til medicinske planter farmaceutiske egenskaber. Den økonomiske værdi øges pga. bioaktive stoffer, som f.eks. med anti-inflammatoriske og antimikrobielle egenskaber. Koncentrationen af specialiserede metabolitter kan forbedres ved at dyrke dem i et kontrolleret miljø, hvilket resulterer i lavere omkostninger til udvinding af de aktive stoffer og en højere værdi af afgrøden. Men som tidligere nævnt er der ingen nemme løsninger til at finde de rette lys- og dyrkningsforhold til de relevante plantearter.

Da vertikalt landbrug er lukkede systemer kan man i princippet tilpasse miljøet til den aktuelle genotype. Der er ikke lavet meget forskning i forædling målrettet vertikalt landbrug. Forsøg med indavlslinier af tomat viste mindre plantehøjde og antal sideskud ved LED, men også mindre udbytte, men det skyldes nok, at udviklingshastigheden var langsommere (Prinzenberg et al. 2022), så konklusionen er, at der ikke var nogen direkte perspektiv for forædling i de tomattyper, der dyrkes i drivhus.

Forædling af planter til vertikalt landbrug er enklere end til væksthuseproduktion, da stressfaktorer fra biotisk og abiotisk stress burde være marginale, så man har fokuseret på kompakte, hurtigt voksende, højtlydende sorter med forbedret kvalitet. I litteraturen er der dog ingen eksempler på, at man forædler for planter med mindre energikrav.

Der er stort set ikke sket nogen specifik forædling til vertikale landbrug og det kan skyldes markedsandelen er lille, men også at der ikke er specifikke forædlingsmål. Det kunne være relevant at udvikle sorter med bedre lysudnyttelse eller bedre fugttolerance. En stor udgift til specielt mikrogreens er frø, så optimering af frøproduktion eller valg af billigere frø er relevant.

Der er som tidligere nævnt i rapporten utallige undersøgelser med forskellige lysniveauer og spektralsammensætninger. Transgene planter er relevante i de områder, hvor GMO er tilladt og accepteret af forbrugerne, mens nye forædlingstekniker med gene silencing kunne være en mulighed for at forbedre næringsammensætning og indholdsstoffer. Dyrkning i lukkede systemer kan sænke risikoen for transgen kontaminering, men GMO er ikke tilladt i EU og interessen fra forbrugerne er begrænset.

Den socioøkonomiske effekt af vertikalt landbrug i Europa er stadig uklar, da potentielle fordele og ulemper for samfundet i øjeblikket er teoretiske. Vertikalt landbrug kan dog være en del af en teknologisk løsning mod miljøudfordringer, men de største udfordringer som produktudvalg og CO₂ aftryk, gør at det ikke har

en større betydning rent økonomisk i Europa i forhold til den normale væksthushproduktion. De nuværende større skala vertikale landbrug er baseret på teknologier fra udlandet, men specielt i området hybride løsning med kombinationen mellem vertikal produktion og normal væksthushproduktion kunne dansk teknologi på produktionssystemer, robotter og klimastyring være et potentielt eksportmarked.

Referencer

- Aaslyng JM, Lund JB, Ehler N, Rosenqvist E (2003) IntelliGrow: A greenhouse component-based climate control system. *Env Model and Software* 18: 657-666
- Al-Chalabi M (2015) Vertical farming: Skyscraper sustainability? *Sustainable Cities and Society* 18: 74-77
- Appolloni E, Pennisi G, Zauli I, Carotti L, Paucek I, Quaini S, Orsini F, Gianquinto G (2021) Beyond vegetables: effects of indoor LED light on specialized metabolite biosynthesis in medicinal and aromatic plants, edible flowers, and microgreens. *J Sci Food Agric* 2021/09/01
- Asseng S, Jamieson PD, Kimball B, Pinter P, Sayre K, Bowden JW, Howden SM (2004) Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research* 85(2-3): 85-102
- Avgoustaki DD, Xydis G (2020) Indoor Vertical Farming in the Urban Nexus Context: Business Growth and Resource Savings. *Sustainability* 12: 2020, 2012(2025), 1965
- Benis K, Ferrão P (2018) Commercial farming within the urban built environment – Taking stock of an evolving field in northern countries. *Global Food Security* 17: 30-37
- Benke K, Tomkins B (2017) Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice, and Policy* 13(1): 13-26
- Blom T, Jenkins A, Pulselli RM, van den Dobbelsteen AAJF (2022) The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production* 377: 134443
- Butturini M, Marcelis LFM (2020) Vertical farming in Europe. In: *Plant Factory*. pp 77-91
- cubicfarms How CubicFarms uses 54%–62% less energy than typical vertical farms - CubicFarm Systems Corp. <https://cubicfarmscom/how-cubicfarms-uses-54-62-less-energy-than-typical-vertical-farms/>
- Delorme M, Santini A (2022) Energy-efficient automated vertical farms. *Omega* 109: 102611
- Despommier D (2010) The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* 6(2): 233-236
- Fanourakis D, Giday H, Hyldgaard B, Bouranis D, Körner O, Ottosen CO (2019) Low air humidity during cultivation promotes stomatal closure ability in rose. *Eur J Hortic Sci* 84(4): 245-252

- Gerovac JR, Craver JK, Boldt JK, Lopez RG (2016) Light Intensity and Quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Growth, Morphology, and Nutrient Content of Brassica Microgreens. *Hortscience* 51(5): 497-503
- Giday H, Fanourakis D, Kjaer KH, Fomsgaard IS, Ottosen CO (2014) Threshold response of stomatal closing ability to leaf abscisic acid concentration during growth. *J Exp Bot* 65(15): 4361-4370
- Graamans L, Baeza E, van den Dobbelsteen A, Tsafaras I, Stanghellini C (2018) Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems* 160: 31-43
- Haque MS, Heinsvig Kjaer K, Rosenqvist E, Ottosen CO (2015) Recovery of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) leaves from continuous light induced injury. *J Plant Physiol* 185: 24-30
- Hooks T, Sun L, Kong Y, Masabni J, Niu G (2022) Adding UVA and Far-Red Light to White LED Affects Growth, Morphology, and Phytochemicals of Indoor-Grown Microgreens. *Sustainability* 14(14): 8552
- Hosseini H, Mozafari V, Roosta HR, Shirani H, van de Vlasakker PCH, Farhangi M (2021) Nutrient Use in Vertical Farming: Optimal Electrical Conductivity of Nutrient Solution for Growth of Lettuce and Basil in Hydroponic Cultivation. *Horticulturae* 7(9): 283
- Jin W, Formiga Lopez D, Heuvelink E, Marcelis LFM (2022) Light use efficiency of lettuce cultivation in vertical farms compared with greenhouse and field. *Food and Energy Security* <https://doi.org/10.1002/fes3.391>
- Jørgensen BN, Ottosen C-O, Kjaer KH, Sørensen JC (2016) DynaGrow – Multi-Objective Optimization for Energy Cost-efficient Control of Supplemental Light in Greenhouses. *Proceedings of the 8th International Joint Conference on Computational Intelligence*,
- Kozai T, Niu G (2020) Chapter 1 - Introduction. In: Kozai T, Niu G, Takagaki M (eds) *Plant Factory (Second Edition)*. Academic Press, pp 3-6
- Kozai T, Sakaguchi S, Akiyama T, Yamada K, Ohshima K (2020) Chapter 25 - Design and management of PFALs. In: Kozai T, Niu G, Takagaki M (eds) *Plant Factory (Second Edition)*. Academic Press, pp 357-375
- Kozai TN, G. Takagaki, T (2019) *Plant Factory - An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* Academic Press,
- Liu J, Oita A, Hayashi K, Matsubae K (2022) Sustainability of Vertical Farming in Comparison with Conventional Farming: A Case Study in Miyagi Prefecture, Japan, on Nitrogen and Phosphorus Footprint. *Sustainability* 14(2), 1042()
- Ma Y, Xu A, Cheng Z-M (2021) Effects of light emitting diode lights on plant growth, development and traits a meta-analysis. *Horticultural Plant Journal* 7(6): 552-564

- Maruo T, Johkan M (2020) Chapter 15 - Tipburn. In: Kozai T, Niu G, Takagaki M (eds) *Plant Factory* (Second Edition). Academic Press, pp 231-234
- Min Q, Marcelis LFM, Nicole CCS, Woltering EJ (2021) High Light Intensity Applied Shortly Before Harvest Improves Lettuce Nutritional Quality and Extends the Shelf Life. *Front Plant Sci* 12: 615355
- Monostori I, Heilmann M, Kocsy G, Rakszegi M, Ahres M, Altenbach SB, Szalai G, Pal M, Toldi D, Simon-Sarkadi L, Harnos N, Galiba G, Darko E (2018) LED Lighting - Modification of Growth, Metabolism, Yield and Flour Composition in Wheat by Spectral Quality and Intensity. *Front Plant Sci* 9: 605
- Naseer M, Persson T, Righini I, Stanghellini C, Maessen H, Ruoff P, Verheul MJ (2022) Bioeconomic evaluation of extended season and year-round tomato production in Norway using supplemental light. *Agricultural Systems* 198: 103391
- Orsini F, Pennisi G, Zulfiqar F, Gianquinto G (2020) Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *EurJHorticSci* 85(5): 297-309
- Orsini F, Gasperi D, Marchetti L, Piovene C, Draghetti S, Ramazzotti S, Bazzocchi G, Gianquinto G (2014) Exploring the production capacity of rooftop gardens (RTGs) in urban agriculture: the potential impact on food and nutrition security, biodiversity and other ecosystem services in the city of Bologna. *Food Security* 6(6): 781-792
- Palma CFF, Castro-Alves V, Morales LO, Rosenqvist E, Ottosen CO, Strid A (2020) Spectral Composition of Light Affects Sensitivity to UV-B and Photoinhibition in Cucumber. *Front Plant Sci* 11: 610011
- Palma CFF, Castro-Alves V, Rosenqvist E, Ottosen CO, Strid A, Morales LO (2021) Effects of UV radiation on transcript and metabolite accumulation are dependent on monochromatic light background in cucumber. *Physiol Plant* 173:750-761.
- Palmer S, van Iersel MW (2020) Increasing Growth of Lettuce and Mizuna under Sole-Source LED Lighting Using Longer Photoperiods with the Same Daily Light Integral. *Agronomy* 10(11): 1659
- Prinzenberg AE, van der Schoot H, van Deth O, Ouzounis T, Gabriëls S, Meijer-Dekens F, Marcelis LFM, Visser RGF, Heuvelink E, Schouten HJ (2022) Does tomato breeding for improved performance under LED supplemental lighting make sense? *Euphytica* 218: Article number: 30 (2022)
- Qu Y, Clausen A, Jørgensen BN (2021) A multi-objective optimization platform for artificial lighting system in commercial greenhouses. *Energy Informatics* 4(2): 44
- Rabobank (2018) Vertical Farming in the Netherlands. Lambert van Horen, Venlo, the Netherlands lecture 27 June 2018.

- Savvas D, Voutsinos O, Mastoraki M, Liakopoulos G, Dekoulis K, Ntatsi G Exploring the possibility to use energy from solar panels to provide artificial light through LEDs in a vertical hydroponic crop of lettuce. 2020, pp 943-950
- Specht K, Siebert R, Thomaier S (2016a) Perception and acceptance of agricultural production in and on urban buildings (ZFarming): a qualitative study from Berlin, Germany. *Agriculture and Human Values* 33(4): 753-769
- Specht K, Weith T, Swoboda K, Siebert R (2016b) Socially acceptable urban agriculture businesses. *Agronomy for Sustainable Development* 36(1): 17
- Stanghellini CVtO, B, Heuvelink Ep (2019) Greenhouse horticulture. Technology for optimal crop production.
- Tsukagoshi S, Shinohara Y (2020) Chapter 14 - Nutrition and nutrient uptake in soilless culture systems. In: Kozai T, Niu G, Takagaki M (eds) *Plant Factory (Second Edition)*. Academic Press, pp 221-229
- Voutsinos O, Mastoraki M, Ntatsi G, Liakopoulos G, Savvas D (2021) Comparative Assessment of Hydroponic Lettuce Production Either under Artificial Lighting, or in a Mediterranean Greenhouse during Wintertime. *Agriculture* 11(6): 503
- Wamelink GW, Frissel JY, Krijnen WH, Verwoert MR, Goedhart PW (2014) Can plants grow on Mars and the moon: a growth experiment on Mars and moon soil simulants. *PLoS One* 9(8): e103138
- Wang Y, Folta KM (2013) Contributions of green light to plant growth and development. *Am J Bot* 100(1): 70-78
- Weidner T, Yang A, Hamm MW (2021) Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Conversion and Management* 243
- Wong CE, Teo ZWN, Shen L, Yu H (2020) Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming. *Trends in Food Science & Technology* 106: 48-63
- Zhang H, Asutosh A, Hu W (2018) Implementing Vertical Farming at University Scale to Promote Sustainable Communities: A Feasibility Analysis. *Sustainability* 10(12)
- Zhen S, Bugbee B (2020) Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: Implications for redefining photosynthetically active radiation. *Plant Cell Environ* 43(5): 1259-1272

Om DCA

DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug er den faglige indgang til jordbrugs- og fødevareforskningen ved Aarhus Universitet.

Centret omfatter institutter og forskningsmiljøer, der har aktiviteter på jordbrugs- og fødevareområdet. Det er primært Institut for Agroøkologi, Institut for Husdyrvidenskab, Institut for Fødevarer, Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning samt dele af Institut for Ingeniørvidenskab.

Aktiviteterne i DCA understøttes af en centerenhed, der varetager og koordinerer opgaver omkring myndighedsbetjening, erhvervs- og sektorsamarbejde, internationalt samarbejde og kommunikation.

Forskningsresultater fra DCA

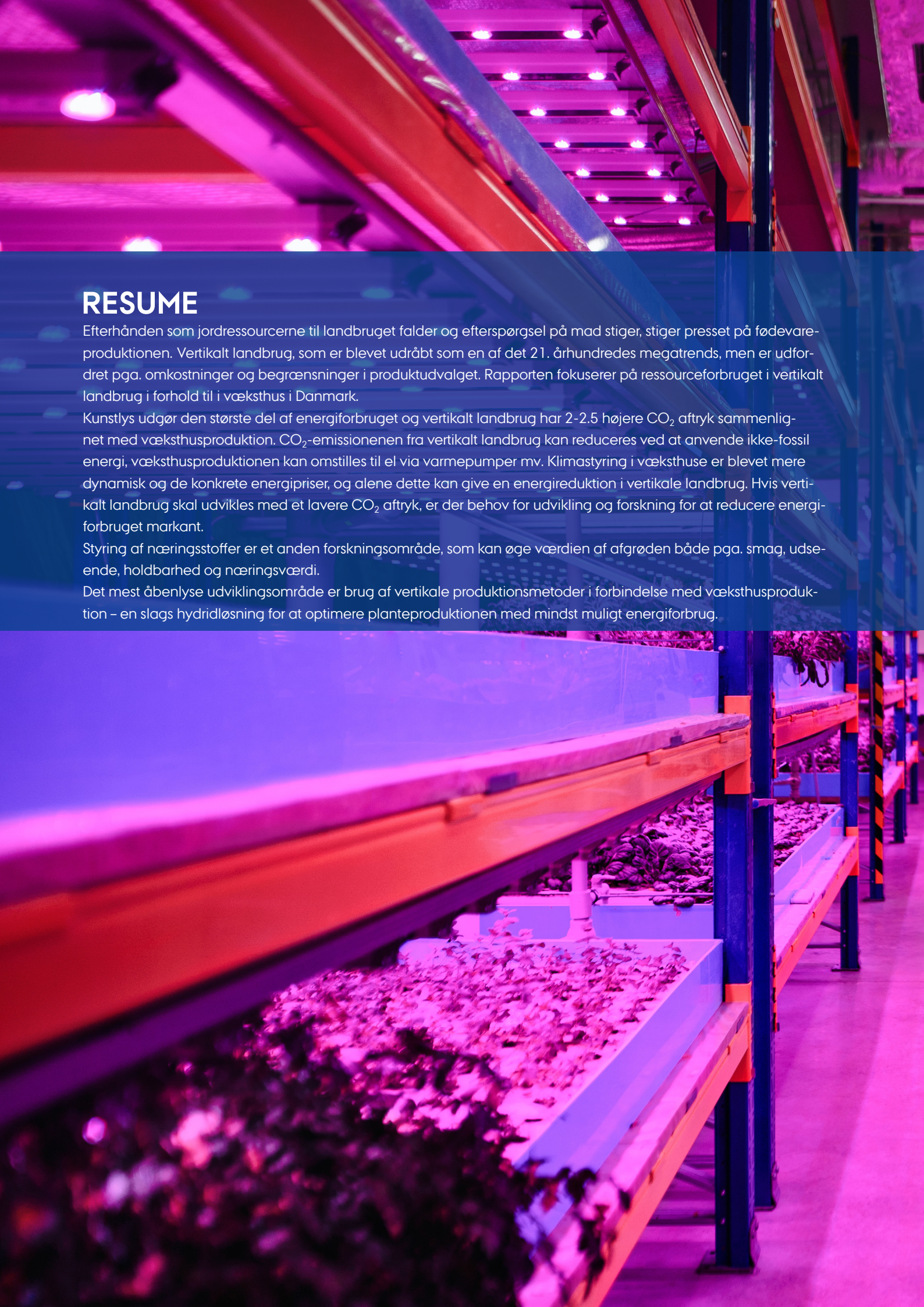
Resultater fra forskningen publiceres i internationale, videnskabelige tidsskrifter. Publikationerne kan findes via universitets publikationsdatabase (pure.au.dk).

DCA rapporter

DCA's rapportserie formidler hovedsageligt myndighedsrådgivning fra DCA til Miljø- og Fødevareministeriet. Der kan også udgives rapporter, som formidler viden fra forskningsaktiviteter. Rapporterne kan frit hentes på centrets hjemmeside: dca.au.dk.

Nyhedsbreve

DCA udsender et nyhedsbrev, der løbende orienterer om jordbrugs- og fødevareforskningen og herunder om nye forskningsresultater, rådgivning, uddannelse, arrangementer og andre aktiviteter. Det er gratis at tilmelde sig nyhedsbrevet, og det kan ske på dca.au.dk.



RESUME

Efterhånden som jordressourcerne til landbruget falder og efterspørgsel på mad stiger, stiger presset på fødevarerproduktionen. Vertikalt landbrug, som er blevet udråbt som en af det 21. århundredes megatrends, men er udfordret pga. omkostninger og begrænsninger i produktudvalget. Rapporten fokuserer på ressourceforbruget i vertikalt landbrug i forhold til i væksthuse i Danmark.

Kunstlys udgør den største del af energiforbruget og vertikalt landbrug har 2-2.5 højere CO₂ aftryk sammenlignet med væksthuseproduktion. CO₂-emissionen fra vertikalt landbrug kan reduceres ved at anvende ikke-fossil energi, væksthuseproduktionen kan omstilles til el via varmepumper mv. Klimastyring i væksthuse er blevet mere dynamisk og de konkrete energipriser, og alene dette kan give en energireduktion i vertikale landbrug. Hvis vertikalt landbrug skal udvikles med et lavere CO₂ aftryk, er der behov for udvikling og forskning for at reducere energiforbruget markant.

Styring af næringsstoffer er et andet forskningsområde, som kan øge værdien af afgrøden både pga. smag, udseende, holdbarhed og næringsværdi.

Det mest åbenlyse udviklingsområde er brug af vertikale produktionsmetoder i forbindelse med væksthuseproduktion – en slags hybridløsning for at optimere planteproduktionen med mindst muligt energiforbrug.