



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# Temperaturstyret luftventil til frugt- og grøntemballage **TEMPVENT**

MUDP rapport

Januar 2021

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Teknologisk institut

ISBN: 978-87-7038-269-4

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

# Indhold

<b>Forord</b>	<b>4</b>
<b>Sammendrag og konklusion</b>	<b>5</b>
<b>1. Baggrund</b>	<b>6</b>
<b>2. Formål</b>	<b>7</b>
<b>3. Teori</b>	<b>8</b>
3.1 Fysisk princip	8
3.2 Respiration	11
3.3 E-MAP (Equilibrium Modified Atmosphere Packaging)	12
3.4 Beregning af antal perforeringer	13
3.5 Termisk gravimetrisk analyse (TGA)	14
<b>4. Resultater</b>	<b>15</b>
4.1 Valg af ventilløsning	15
4.2 Prædeformation ved hjælp af skive og valser	17
4.3 Prædeformation ved hjælp af nål eller streng	17
4.4 Prædeformation ved hjælp af vakuumvalse	17
4.5 Prædeformation ved hjælp af kølet valse	17
4.6 Valg af produktionsløsning	18
4.7 Måling af respiration	18
4.8 Beregning af antal perforeringer	19
4.9 Termisk gravimetrisk analyse (TGA)	21
4.10 Beregning af ventildimensioner	21
4.11 Test af ventilløsning	22
<b>5. Konklusion</b>	<b>25</b>
<b>6. Referencer</b>	<b>26</b>

# Forord

I denne rapport redegøres for resultaterne af udviklingsprojektet "Temperaturstyret luftventil til frugt- og grøntemballage – TEMPVENT". Resultaterne er fremkommet i et samarbejde mellem Scanstore Packaging A/S, Yding Grønt A/S og Teknologisk Institut.

Projektet er gennemført i perioden 2017 til 2019 og har modtaget tilskud fra Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP).

Scanstore Packagings rolle var at deltage i udviklingen af ventilen og efterfølgende producere og sælge den udviklede emballage med indbygget ventil til frugt- og grøntproducenter.

Yding Grønns rolle i projektet var at teste den udviklede emballage med ventil på rucolasalat og efterfølgende anvende den til deres øvrige produkter.

Teknologisk Institut har stor knowhow om temperaturstyrede ventilløsninger baseret på plastmaterialer med forskellige termiske udvidelseskoefficienter. Teknologisk Institut var ansvarlig for optimering af ventilløsningen, laboratorietest og industriel implementering i tæt samarbejde med Scanstore Packaging A/S og Yding Grønt A/S.

# Sammendrag og konklusion

For at kompensere for temperaturudsving og brudte kølekæder ved distribution, salg og transport af frisk frugt og grønt, er det helt centralt at få udviklet en perforeret emballagefilm, der er relativt lukket ved 0-5 °C, hvor produktets iltforbrug er lavt, men som kan åbne sig ved forhøjede temperaturer, hvor produktets iltforbrug er højt. Formålet med dette projekt er at videreudvikle og implementere en temperaturstyret ventil, der kan sikre opretholdelsen af en optimal modificeret atmosfære i emballering til frisk frugt og grønt, ved varierende temperaturer. Valideringen viser, at den fremstillede temperaturstyret ventil er implementerbar og fungerer, men resultatet af implementeringen er ikke så god som forventet, da den praktiske kapacitet af den producerede emballage med indbygget ventil er cirka 20 procent af den forventede.

# 1. Baggrund

Tal fra Landbrug og Fødevarer [1] viser, at der årligt smides mere end 700.000 tons mad ud, heraf stammer 41 % fra frisk frugt og grønt [2]. En del af dette spild kunne være undgået, hvis emballagen havde været optimeret til de betingelser, som produkterne blev udsat for gennem distribution, salg og hos forbrugerne.

Emballering af frisk frugt og grønt kan være en udfordring sammenlignet med andre fødevarer. Frisk frugt og grønt er nemlig levende plantevæv, som lever videre efter det er høstet. Produkterne forbruger ilt og afgiver kuldioxid, de respirerer, med risiko for at ilten i emballagen opbruges og produkterne bliver kvalt på grund af iltmangel. Dette kan afhjælpes ved f.eks. at perforere emballagen, så ilttransporten ind i emballagen øges.

Høj iltkoncentration i emballagen giver på den anden side en høj respirationshastighed og dermed en kort holdbarhed. Sænkes iltniveauet i emballagen, sænkes respirationshastigheden generelt og holdbarheden forlænges.

For at sikre lav respiration, lang holdbarhed og mindre madspild er det ønskeligt at sikre lav iltkoncentration i emballagen. Dette kan gøres ved at tilpasse emballagens ilttransmission til produktets iltforbrug ved konstant temperatur og lav iltkoncentration. Når temperaturen stiger på grund af brudte kølekæden under distribution og salg eller hjemme hos forbrugeren stiger produktets respirationshastighed, mens emballagens ilttransmissionshastigheden ikke stiger tilsvarende. Det kan føre til, at headspace i emballagen bliver ilt fri og at produktet derfor bliver kvalt og uspiselig.

For at kompensere for eventuelle temperaturudsving og brudte kølekæder ved distribution, salg og hos forbrugeren, er det helt centralt at få udviklet en perforeret emballagefilm, der er relativt lukket for transport af ilt og kuldioxid ved 0-5 °C, hvor produktets iltforbrug er lavt, men som kan åbne sig ved forhøjede temperaturer, hvor produktets iltforbrug er højt.

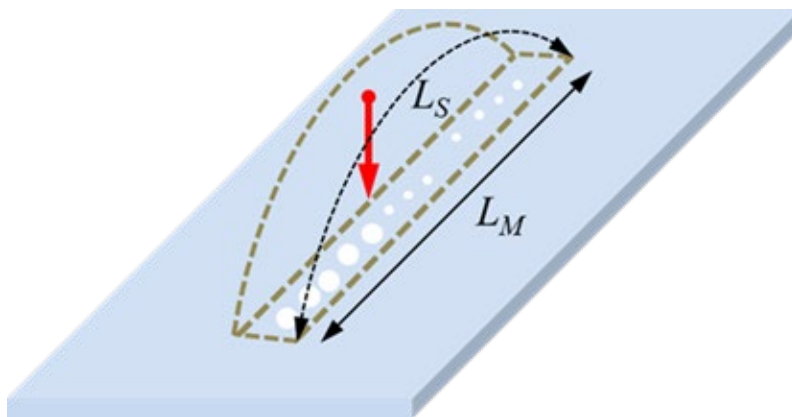
## 2. Formål

Formålet med dette projekt er at reducere spildet af frisk frugt og grønt i detailledet og hos forbrugeren og dermed reducere klimabelastningen. Det skal gøres ved udvikle og implementere en temperaturstyret luftventil, der kan sikre opretholdelsen af en optimal modificeret atmosfære i emballage med frisk frugt og grønt, selvom temperaturen varierer.

# 3. Teori

## 3.1 Fysisk princip

Ventilen bygger på et princip, hvor man udnytter plastfoliers forskellige termiske udvidelseskoefficienter til at skabe en ventil, der sikrer en temperaturkontrolleret udveksling af luft mellem en emballages headspace og omgivelserne. Dette princip kaldes temperaturkompensering [3]. Det er blevet foreslået, at en sådan temperaturkontrolleret ventil kan fremstilles ved hjælp af et relativt smalt stykke plastfolie (topfolien), hvis ender er fæstnet til et større stykke plastfolie (matrixfolien). Matrixfolien, der er selve emballagen, er mikroperforeret, og ventilen er placeret, så den dækker alle perforeringer og derved blokerer for den direkte luftudveksling mellem omgivelserne og emballages headspace. Plastmaterialerne til topfolien og matrixfolien er valgt så den termiske udvidelseskoefficient for topfolien  $\alpha_S$  ligger langt over den termisk udvidelseskoefficient for matrixfolien  $\alpha_M$ ,  $\alpha_S \gg \alpha_M$ .



**FIGUR 1.** Princip for temperaturkompenserende ventil. Et relativt smalt stykke plastfolie (topfolien), hvis ender er fæstnet på et større stykke plastfolie (matrixfolien). Matrixfolien er mikroperforeret, og ventilen er placeret, så den kan dække alle perforeringer helt og derved blokere den direkte luftudveksling.

Er den termiske udvidelseskoefficienter ( $\alpha_S$  og  $\alpha_M$ ) for de to plastmaterialer kendt, er det muligt at beregne længden af topfolien  $L_S$  og afstanden mellem de to punkter hvor topfolien er fastgjort til matrixfolien  $L_M$ . (se også figur 1). Følgende ligning gælder hvis den omgivende temperatur  $t$  og  $t_c$  hvis  $t > t_c$ :

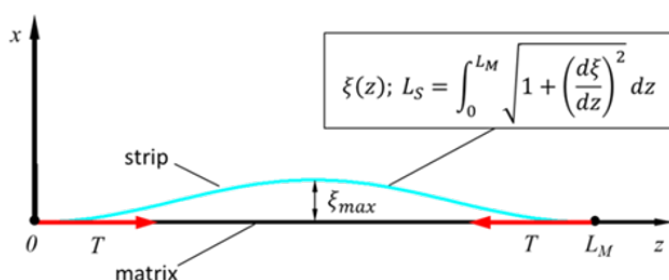
$$\frac{L_M}{1 + \alpha_M(t - t_c)} = \frac{L_S}{1 + \alpha_S(t - t_c)} = L_c \quad (1)$$

Ligningen viser, at topfoliens længde og afstanden mellem dens fastgørelsespunkter til matrixfolien er lige store, når temperaturen  $t = t_c$ , hvilket betyder, at ventilen lukker for luftudveksling. Her betegner  $L_c$  og  $t_c$  henholdsvis topfoliens længde og temperatur, når ventilen er lukket. Det vil sige at længden af topfolien og matrixfolien er lige lange mellem de to fæstningspunkter. Stiger temperaturen  $t$ , i forhold til temperaturen  $t_c$ , hvor ventilen er lukket, vil ventilen åbne sig,



fordi topfolien udvider sig mere end matrixfolien med den samme startlængde  $L_c$ . Dette skyldes valget af folie, hvor udvidelseskoefficienten  $\alpha_S > \alpha_M$ . For at være mere præcis, er topfoliens forlængelse ved en temperaturstigningen  $\Delta t = t - t_c$  større end matrixfoliens forlængelse ( $\alpha_S \Delta t > \alpha_M \Delta t$ ), og derfor udsættes topfolien for deformation ved kompression forårsaget af en kraft langs med topfolien, som det er vist i figur 2. Her er  $E$  Youngs modul af topfilmen, og  $w$  og  $h$  er topfoliens bredde og tykkelse ( $h \ll w$ ).

$$|\vec{T}| = -E\alpha_S\Delta twh \quad (2)$$



**FIGUR 2.** Geometri for et ligevægtsproblem af et smalt termisk udspændt bånd, der er hæftet fast i begge ender.

Den termoelastiske kompression resulterer i en opadgående deformation af topfilmen, da begge dens ender er fastgjort på matrixfolien, og det er denne deformation, der styrer luftudvekslingen gennem perforeringerne i matrixen.

Formålet med analysen har været at finde de geometriske dimensioner på ventilen, der sørger for en tæt lukning og fuld åbning.

Baseret på den lineære teori om ligevægt og stabilitet af tynde stænger og plader [4], og dens generalisering over et område med store kvasi-lineære deformationer, er formen af den bøjede strimmel med fastgjorte ender, vist i figur 2, defineret som følger:

$$\xi(z) = \frac{1}{2} \xi_{max} (1 - \cos kz) \quad (3)$$

Her er  $\xi_{max}$  den maksimale afbøjning af strimlen, og skalaparameteren  $k$  forbinder temperaturvariation, geometriske dimensioner og koefficienten for termisk ekspansion af strimlen analytisk ved hjælp af følgende ligning:

$$k = \frac{2}{h} \sqrt{3\alpha_S\Delta t} = \frac{2\pi n}{L_M} \quad (4)$$

hvor  $n$  er et hvilket som helst heltal. Ligning (4) er derfor en betingelse for implementeringen af strimmelventilen, dvs. at dette er en ventil, hvis tykkelse  $h$  og koefficient for termisk ekspansion  $\alpha_S$  udelukkende opfylder ligning (4), så ventilen kan være åben og lukket på grund af den specifikke temperaturændring  $\Delta t$ , når den er fastgjort til matrixfilmens overflade med længden  $L_M$ . Desuden svarer længden af den bøjede topfilm til integralet

$$L_S = \int_0^{L_M} \sqrt{1 + \left(\frac{d\xi}{dz}\right)^2} dz \quad (5)$$

og kan samtidig blive udledt af ligning (1) til

$$L_S = L_M \frac{1 + \alpha_S \Delta t}{1 + \alpha_M \Delta t} \quad (6)$$

Ved at sætte ligning (5) og (6) sammen får man følgende ligning for den maksimale afbøjning af topstrimmelen:

$$\int_0^{2\pi n/k} \sqrt{1 + \frac{k^2}{4n^2} \xi_{max}^2 \sin^2 \frac{k}{n} z} dz = \frac{2\pi n}{k} \frac{1 + \alpha_S \Delta t}{1 + \alpha_M \Delta t} \quad (7)$$

Denne ligning løses numerisk, og ventilparametrene  $L_M$ ,  $L_S$ , and  $L_C$  er derefter blevet beregnet ved at bruge ligningerne (1), (3), (4) og (6).

Løsning af ligningen (7) tillader udregning af de geometriske dimensioner for ventilen, hvis temperaturforskellen  $\Delta t$  og ventilens ønskede åbning  $\xi_{max}$ , er givet. Disse udregninger blev brugt til at producere ventilen, se afsnit 4.9.

## 3.2 Respiration

Frisk frugt og grønt er levende plantevæv, der efter de er høstet, skaffer energi til opretholdelse af cellernes struktur og funktionalitet ved respiration. Ved respiration nedbrydes organisk materiale, primært kulhydrater, under frigivelse af energi.

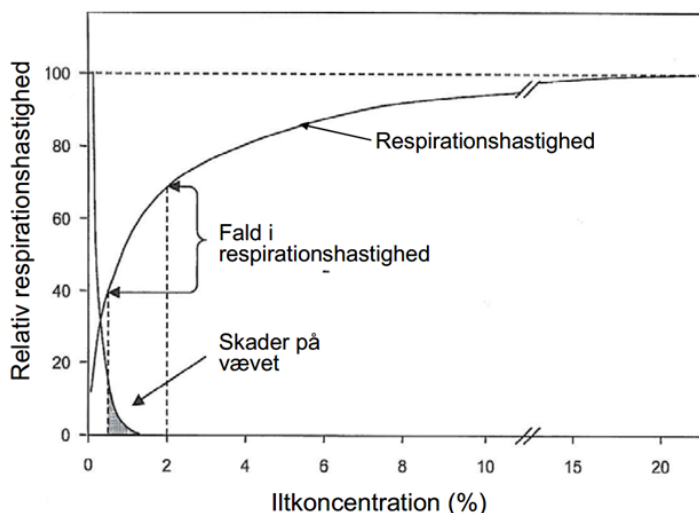
Ved aerob respiration nedbrydes kulhydrat, under forbrug af ilt, til vand og kuldioxid. Ved aerob respiration gennemgår produktet en normal ældning. Tab af lagret organisk materiale ved respiration betyder, at produktets ældning fremskyndes og produktets oprindelige og naturlige kvalitet går tabt.

Når frugt og grønt ikke har adgang til ilt skaffer produkterne energi ved anaerob respiration, hvor kulhydrater nedbrydes kuldioxid og ethanol. Ved denne proces ophobes kuldioxid og ethanol i cellerne og den anaerob respiration fører hurtigt til energimangel, kvælning af cellerne og ændringer i produktets kvalitet herunder dårlig lugt og smag.

Holdbarheden og kvaliteten af høstet frugt og grønt afhænger af respirationshastigheden. Jo hurtigere respirationshastighed, jo kortere holdbarhed.

Temperaturen er den vigtigste parameter i forhold til at sænke respirationshastigheden, jo lavere temperatur, jo lavere respirationshastighed, men derudover afhænger respirationen også af en række andre faktorer som f.eks. høsttidspunkt, modenhed, sort, skader og iltkoncentrationen i emballagen. Høj iltkoncentration i emballagen giver en høj respirationshastighed og dermed en kort holdbarhed. Falder iltindholdet i emballagen til under 2%, falder respirationshastigheden markant, men falder respirationshastigheden yderligere til 1,5% er der stor risiko for varige skader på vævet (se figur 3).

Respirationshastigheden for bladgrønt, som rucola, begynder så småt at falde, når iltkoncentrationen når under 10%, men den største effekt ses, når iltkoncentrationen er mellem 0,5% - 2% (Se figur 3).



**FIGUR 3.** Sammenhæng mellem iltkoncentration og relativ respirationshastighed i salat [5].

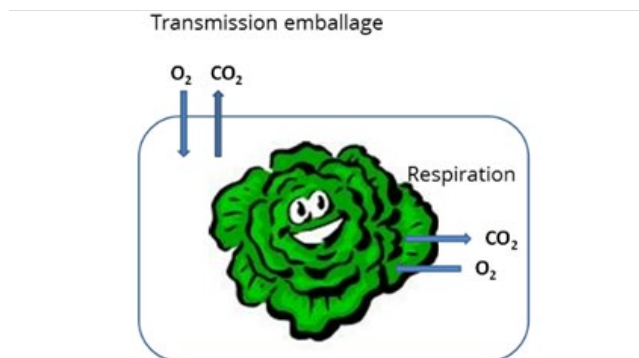
Det øgede udbud af convenience-produkter på markedet medfører større krav til emballagens gennemtrængelighed for ilt, da forarbejdede produkter har en højere respirationshastighed end ikke forarbejdede produkter og derfor en kortere holdbarhed.

**TABEL 1.** Oversigt over respirationshastigheder for udvalgt frugt og grønt [6].

	Respiration ved 5 °C (ml O <sub>2</sub> /(kg × time))	Eksempler
Meget lav	<2,5	Tørret frugt og grønt
Lav	2,5-5	Løg, rødbeder, kartofler (moden), blegselleri, hvidløg, græskar, æbler, vindruer, citrusfrugt, tranebær, honningmelon, kiwi, papaya, ananas, vandmelon
Moderat	5-10	Gulerødder uden top, agurk, hovedsalat, tomater, hvidkål, knoldselleri, kartofler (umoden), radiser uden top, squash, pære, kirsebær, blåbær, blommer, stikkelsbær, bananer, mango, nektariner, fersken
Høj	10-20	Bladsalat, porre, blomkål, gulerod med top, avocado, radiser med top, brombær, hindbær, jordbær
Meget høj	20-30	Broccoli, bønnespirer, grønkål, artiskok, rosenkål, forårsløg, grønne bønner
Ekstrem høj	>30	Asparges, persille, champignon, spinat, grønne ærter, sukker majs

### 3.3 E-MAP (Equilibrium Modified Atmosphere Packaging)

Frisk frugt og grønt besidder en unik evne til at skabe en optimal modificeret atmosfære af dem selv uden at tilføje nogen form for gas til emballageprocessen. Denne evne kaldes ofte E-MAP (Equilibrium Modified Atmosphere Packaging). Ved E-MAP udnyttes at frisk frugt og grønt forbruger ilt og udskiller kuldioxid. Produktet skaber derved, i samspil med emballagen, den optimale sammensætning af atmosfæren i emballagen.



**FIGUR 4.** Princippet ved E-MAP.

Målet med E-MAP er at skabe optimale iltforhold i emballager, samt sikre, at der ikke opstår iltfrie forhold i emballagen. Princippet bag E-MAP er relativt enkel: Ilttransmissionshastigheden (OTR) skal matche produktets forbrug af ilt ved respiration.

$$OTR \times A \times \Delta p = RRO_2 \times M \quad (8)$$

OTR er iltransmissionshastigheden for emballagematerialet ( $\text{ml}/(\text{m}^2 \times \text{døgn} \times \text{atm})$ ).

A er emballagens overfladeareal ( $\text{m}^2$ ).

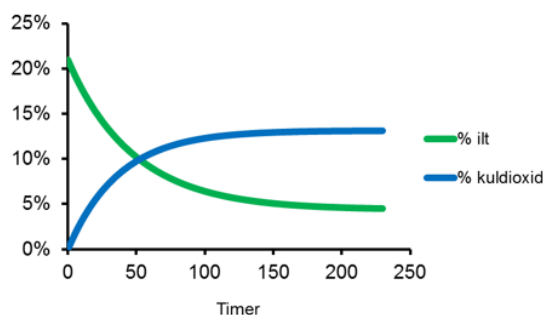
$\Delta p$  er forskellen mellem det atmosfæriske iltryk uden for emballagen (0,21 atm) og det ønskede optimale iltryk inde i emballagen (f.eks. 5% oxygen  $\approx 0,05$  atm).

$RR_{O_2}$  er produktets respirationshastighed ( $\text{ml}/(\text{kg produkt} \times \text{time})$ ) ved den relevante distribution og opbevaringstemperatur og det optimale iltryk (f.eks. 5 °C og 5% ilt).

M er produktets vægt (kg)

Det beskrevne designprincip bygger på konstante (eller i det mindste kendte) forhold, hvilket sjældent er tilfældet i praksis.

Pakkens produktet i atmosfærisk luft, og er emballagen optimeret i forhold til produktets respirationshastighed ved den ønskede opbevaringstemperatur og iltkoncentration, vil der på et tidspunkt opstå ligevægt mellem produktets iltforbrug og emballagens ilt- og kuldioxidtransmissionshastighed.



FIGUR 5. Typisk ilt- og kuldioxidkoncentration forløb i produktoptimeret emballage.

### 3.4 Beregning af antal perforeringer

Frugt og grønt stiller forskellige krav til emballagen i forhold til hvor meget ilt, der skal transporteres fra omgivelserne og ind i emballagen og derfor skal antal perforeringer, deres størrelse og ventilens dimensioner optimeres i forhold til produktets respiration, ønskede ligevægts iltkoncentration og opbevaringstemperatur.

De fleste plastemballagematerialer på markedet i dag er for tætte til mellem- og højtrespirende produkter, samt forarbejdet frugt og grønt og det er derfor nødvendigt at perforere emballagen, ved hjælp af laser eller nåle, for at sikre at tilstrækkeligt ilt kan transporteres ind i emballagen, så produkterne ikke bliver kvalt.

En emballages optimale iltransmissionshastighed og antallet af perforeringer beregnes ved hjælp af en model udviklet af Teknologisk Institut. Den numeriske model bruger følgende finit-differentialligning:

$$\Delta V_O = RR \cdot m$$
$$\Delta V_O = \Delta p_O \cdot \Delta \tau [P_O \cdot A + D_O \cdot \pi \cdot d^2 / 4 \cdot (h_m + d)] \quad (9)$$

Her betyder RR respirationshastighed ved optimal iltkoncentration og temperatur, m er produktets masse,  $\Delta V_O$  er volumen ilt transporteret gennem folien,  $P_O$  er matrixfoliens lltpermeabilitetskoefficient, A er arealet af matrixfolien,  $\Delta p_O$  er forskellen i ilt partialtrykket,  $\Delta \tau$  er tilvæksten i tid,  $D_O$  er llt diffusionskoefficienten i luft,  $h_m$  er tykkelsen af matrixfolien og  $d$  er perforeringens diameter.

### **3.5 Termisk gravimetrisk analyse (TGA)**

Emballagen er en temperaturstyret aktiv emballage fremstillet af to plastfolier med forskellige termiske udvidelseskoefficienter. De to benyttede folier er LDPE (Low density polyethylene) og BOPP (Biaxially Oriented Polypropylene). Den vigtigste grund til, at netop disse to materialer er valgt til ventilen er, at de har meget forskellige termiske ekspansionskoefficienter, men derudover er det folier, som normalt anvendes til emballering af frisk frugt og grønt.

# 4. Resultater

## 4.1 Valg af ventilløsning

De tidligere testede temperaturstyrede ventilløsninger består af en smal topfolie, som var fastgjort på en matrixfolie (selve emballagen). Denne løsning er meget svær om end umulig at implementere i industrielt. Projektpartnerne fandt derfor i samarbejde frem til to mulige løsninger for implementering af en temperaturstyret ventil, der udnytter materialernes forskellige termiske udvidelseskoefficient. De to løsninger er:

- Lamineringsløsning
- Labelløsning

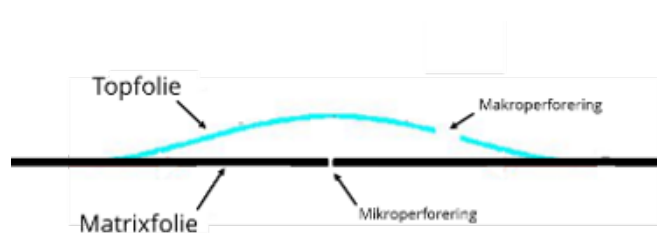
Laminering af en topfolie med høj termisk udvidelseskoefficient og makroskopiske perforeringer til en matrixfolie med lavere udvidelseskoefficient og mikroperforeringer.

Påsætning af selvklæbende label med høj termisk udvidelseskoefficient og mikroperforeringer til en matrixfolie med lavere koefficient og makroperforering.

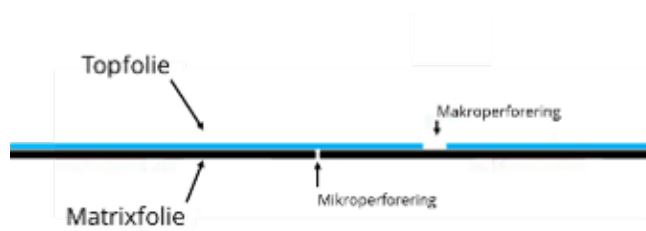
Partnerne valgte at arbejde videre med lamineringsløsningen, da den er nemmest at håndtere i det daglige arbejde med pakning af frisk frugt og grønt.

Den simpleste metode, til fremstilling af ventilløsningen, er at laminere topfolien og matrixfolien sammen i kolde omgivelser (ex. 5 °C), hvor ventilen skal være lukket. Denne løsning er ikke teknisk mulig at gennemføre, da påføring af nedkølet lim, ændrer hærdetider og viskositet af limen, hvilket gør den svær at arbejde med. Produktionsmæssigt kræver denne løsning ud over en nedkølet lim også nedkølede folier, produktionslokaler og valser på lamineringsmaskinen. Det blev derfor besluttet at undersøge andre løsninger.

Udfordringen ved at producere ventilen ved temperaturer over 5 °C er, at topfolien skal produceres med en prædeformation svarende til ventilens åbne tilstand, se figur 6.



Figur 6. Åben ventil

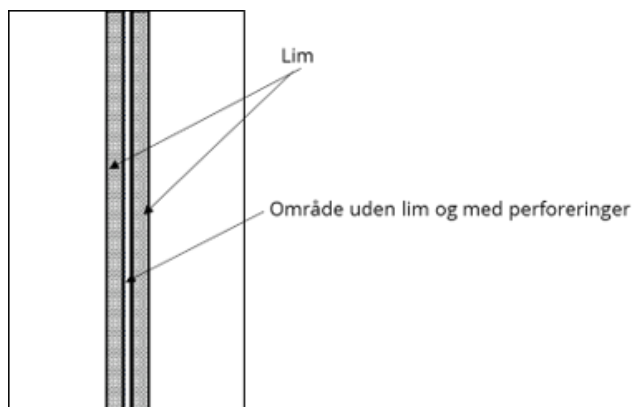


Figur 7. Lukket ventil

Prædeformationen afhænger af temperaturer og det er derfor vigtigt, at kunne styre temperaturen eller omstille maskinen efter temperaturen.

Topfolien lamineres på matrixfolen på hver side af en række mikroperforeringer. Lamineringen kan enten laves som fuld laminering eller, som valgt i dette projekt, laminering af en 5 cm bred topfolie over perforeringerne. Til lamineringen anvendes en tokomponent opløsningsbaseret lim godkendt til kontakt med fødevarer.

Topfolien perforeres med makrohuller, for at sikre tilstrækkelig transport af ilt og kuldioxid til og fra matrixfoliens perforeringer, der er begrænsende for udvekslingen af ilt og kuldioxid mellem headspace og atmosfæren.



**FIGUR 8:** Udsnit af folierulle, som viser hvor folien er lamineret sammen med lim og hvor folien ikke er påført lim.

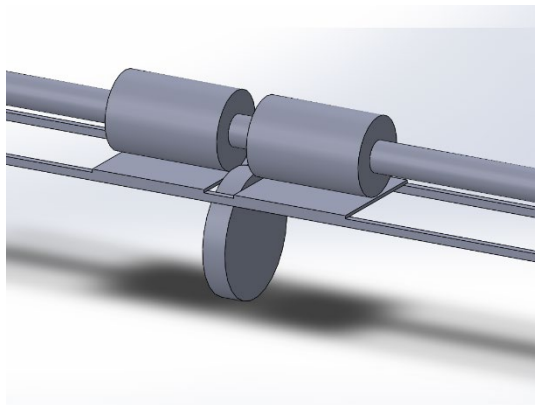
Projektets partnere er kommet frem til fire mulige løsninger til fremstilling af en prædeformeret ventil:

1. Prædeformation ved hjælp af skiver og valser.
2. Prædeformation ved hjælp af nål eller streng.
3. Prædeformation ved hjælp af vakuumbalse.
4. Prædeformation ved hjælp af kølet valse.



## 4.2 Prædeformation ved hjælp af skive og valser

Med denne metode løftes filmen nedefra ved hjælp af hjul, før filmen overføres til lamineringsdelen, hvilket skaber den ønskede prædeformation. For at fastholde prædeformationen og undgå deformationer og rynker i andre områder langs folien er der på hver side af skiven monteret valser, som sikrer tryk fra oversiden. Dimensionerne af ventilen kan styres ved hjælp af hjulenes bredde og højde. Fordelen ved denne metode er, at det er nemt at justere hvor meget topfolien skal løftes.



FIGUR 9. Prædeformation ved hjælp af skive og valser.

## 4.3 Prædeformation ved hjælp af nål eller streng

En nål eller streng, som er fastgjort på lamineringsmaskinen, løfter LDPE-folien, så den ønskede prædeformation sker lige før og under dens laminering til BOPP-filmen. Den største forskel mellem de to komponenter er, at nålen løfter filmen ved at anvende en opadgående kraft, mens strengen ganske enkelt løfter den ved blot at ligge mellem de to folier. Ventildimensionerne kan varieres ved hjælp af nålens eller snorens diameter. For at undgå friktion mellem nål/streng bør materialerne til disse komponenter have en lav friktionskoefficient. Nålens længde skal være så kort som mulig for at mindske friktion mellem nålen og folien. Hvis en streng anvendes, er ulempen, at den er fleksibel og kan bevæge sig frit mellem folierne. Strengen skaber dog mindre varme og stress end en nål.

## 4.4 Prædeformation ved hjælp af vakuumvalse

Tanken bag dette koncept er at bruge vakuum til at suge topfilmen opad og slippe igen, når filmen er blevet lamineret, og den er på vej til at blive rullet op. Vakuumbet vil blive styret af et rullende element, af rustfri stålcylander med huller.

## 4.5 Prædeformation ved hjælp af kølet valse

Dette koncept bruger afkølede valser til at sænke temperaturen på topfilmen, hvilket medfører at folien "krymper". Når folien er afkølet, lamineres den straks med matrixfolien, som har stuetemperatur. Når topfilmen opvarmes igen på grund af den omgivende temperatur, udvides den og skaber den ønskede åbning.

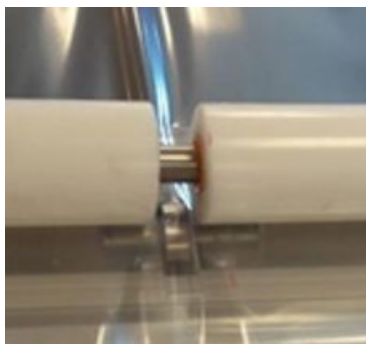
## 4.6 Valg af produktionsløsning

Til vurdering af hvilket koncept, som er bedst egnet til produktion af ventilen, anvendes en scorematrix med rangordningssystem fra 1 til 5. Da det er vigtigt at kunne kontrollere og ændre ventildimensionerne i forhold til bl.a. produktet, er det vægtet højest.

TABEL 2. Scorematrix

Kriterier	Vægtning	Skiver og valser	Nål/streng	Vakuumpåse	Kølet påse
Kontrol af dimensioner	30%	4	2	3	2
Let at producere	25%	4	4	2	4
Vedligeholdelse	25%	3	3	3	3
Setup	10%	2	3	2	4
Pris	10%	3	3	4	3
Sum	100%	3,45	2,55	2,55	3,05

Af de fire lamineringsløsninger får prædeformation ved hjælp af skiver og valser den bedste score og er derfor valgt til produktion af emballage til forsøg.



FIGUR 10. Foto af skive og valseløsning.

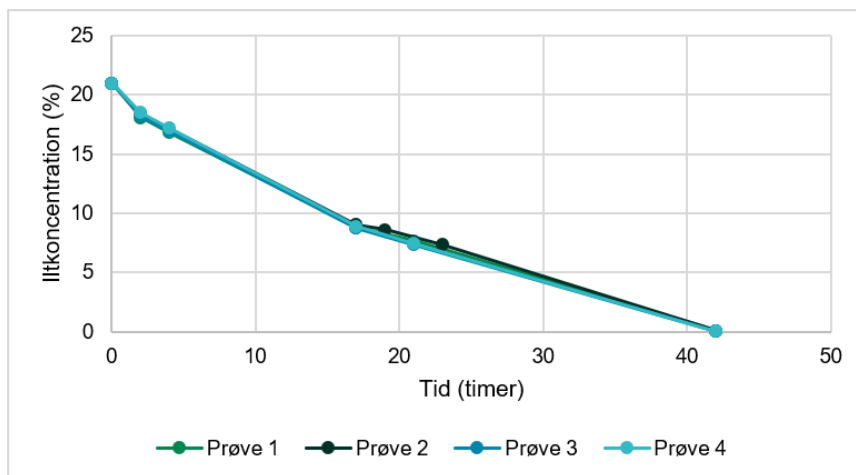
## 4.7 Måling af respiration

Som modelprodukt til verifikation af ventilens funktion anvendes rucolasalat, der er et højrespirerende produkt, som kan have stor gavn af E-MAP (Equilibrium Modified Atmosphere Packaging).

En kendt mængde rucolasalat anbringes i tætte glasbeholdere og iltkoncentrationen måles løbende. Respirationshastigheden udregnes ud fra disse resultater.



**FIGUR 11.** Respirationsglas med rucolasalat..



**FIGUR 12.** Resultat af iltkoncentrationsmålinger i respirationsglas.

Respirationshastigheden blev ved hjælp af ovenstående respirationsdata beregnet til 15 og 85 ml/(kg\*h) ved henholdsvis 5 °C og 23 °C.

#### 4.8 Beregning af antal perforeringer

Respirationshastigheden for et produkt kan variere gennem en sæson, derfor vælges det at optimere emballagen til en iltkoncentration på ca. 8%, så risikoen for at der skulle opstå ilt fri forhold i emballagen minimeres.

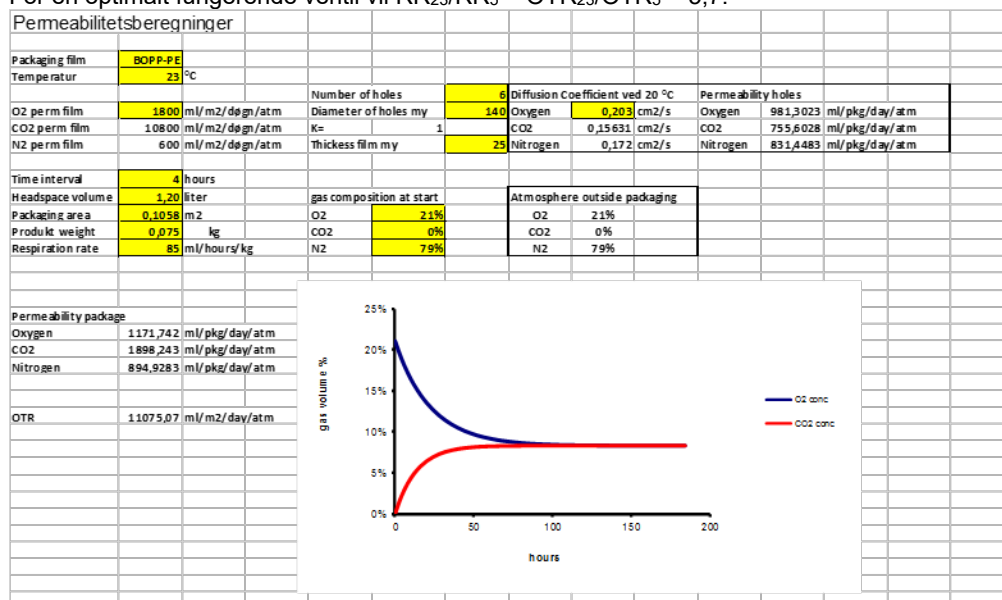
Antallet af perforeringer i matrixfolien bestemmes ud den ønskede ilttilførsel ved 23 °C, hvor ventilen er åben.

Til beregning af antal nødvendige perforeringer i emballagen benyttede vi en numerisk model udviklet af Teknologisk Institut. Data til beregning af antal perforeringer ses i tabel 3 og figur 13 viser et beregningseksempel.

**TABEL 3.** Data til beregning af antal perforeringer i emballagen til rucola

Produktdata (rucola)			Materialedata (BOPP)				
	Target O <sub>2</sub> (%)	Vægt (kg)	Respirationshastighed (RR) (ml O <sub>2</sub> /kg*time)	OTR at 5°C (ml/(m <sup>2</sup> *dag*atm))	Tykkelse (µm)	Areal (m <sup>2</sup> )	Volumen (L)
5 °C	?	0,075	15	400	25	0,11	1,2
23 °C	7	0,075	85	1800	25	0,11	1,2

For en optimalt fungerende ventil vil  $RR_{23}/RR_5 = OTR_{23}/OTR_5 = 5,7$ .



**FIGUR 13.** Model til beregninger af antal perforeringer i emballage til rucolasalat.

Hvis folien perforeres med 6 perforeringer med en diameter på 140 µm, viser beregningerne at der opstår en ligevægt ved ca. 8 % ilt, hvis respirationen er 85 ml O<sub>2</sub>/kg\*time og temperaturen er 23 °C. Beregnet OTR for emballagen ved 23 °C og 5 °C ses i tabel 4.

**TABEL 4.** Resultater a OTR-beregninger

	Antal perforeringer	Diameter perforeringer (µm)	Iltransmissionshastighed- emballage (ml/(emballage*dag*atm))	Iltransmissionshastighed – folie (ml/(emballage*dag*atm))	Iltransport perforering (ml/(6 perf.*dag*atm))
5 °C	6	140	912	40	870
23 °C	6	140	1172	190	981

PE-topfolien perforeres med 500 µm huller, for at sikre tilstrækkelig transport af ilt og kuldioxid til matrixfilmens perforeringer, der er begrænsende for udvekslingen af ilt og kuldioxid mellem headspace og atmosfæren.



**FIGUR 14.** Foto af perforeringer i matrixfolie og topfolie. De røde cirkler som markerer mikroperforeringerne i BOPP-folien og det sorte rektangel som markerer PE-foliens makroperforeringer.

#### 4.9 Termisk gravimetrisk analyse (TGA)

De termiske udvidelseskoefficienter er målt ved hjælp af TGA-metoden (termisk gravimetrisk analyse) på Teknologisk Institut. Resultaterne viser, som forventet, at den termiske udvidelseskoefficient er meget højere for LDPE sammenlignet med BOPP. Ud fra resultaterne af TGA-analysen og viden om emballage normalt anvendt til emballering af frugt og grønt blev det besluttet at anvende en LDPE-folie som topfolie og BOPP-matrixfolie til fremstilling af ventilen.

**TABEL 5.** Resultater af TGA- målinger.

Termisk udvidelseskoefficient [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]		
Materiale	Maskinretning	På tværs af maskinretning
LDPE	109	291
BOPP	20	58

#### 4.10 Beregning af ventildimensioner

Teoretisk evaluering af ventilen vist i afsnit 3.1 er anvendt til beregning af ventildimensionerne i dette afsnit.

Beregningerne blev foretaget for de samme polymerfilm, som blev brugt i proof-of-concept forsøgene. Matrixfolien er BOPP (Biaxially oriented polypropylene), hvis termiske udvidelseskoefficient er målt til  $\alpha_M=57,74 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , og topfolien er LDPE (Low density polyethylene) med en tykkelse  $h=50 \text{ }\mu\text{m}$  og  $\alpha_S=291,37 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Temperaturændringen er  $\Delta t = t - t_c = 23 \text{ }^{\circ}\text{C} - 5 \text{ }^{\circ}\text{C} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Resultaterne af beregningerne for udvalgte skaleringsparametre  $n$  er vist i Tabel 6.

**TABEL 6.** Mulige dimensioner og maksimale åbninger for en LDPE/BOPP-ventil.

n	$L_M = \frac{2\pi n}{k}$ , mm	$L_S = L_M \frac{1+\alpha_S \Delta t}{1+\alpha_M \Delta t}$ , mm	$\xi_{max}$ , mm	$L_C$ , mm
1	1.2189	1.2243	0.0500	1.2175
2	2.4378	2.4486	0.1000	2.4351
5	6.0944	6.1214	0.2590	6.0877
10	12.1888	12.2428	0.5180	12.1754
20	24.3775	24.4856	1.0352	24.3508

Til prototyperne, se figur 15, blev skaleringsparameteren  $n = 10$  brugt.

#### 4.11 Test af ventilløsning

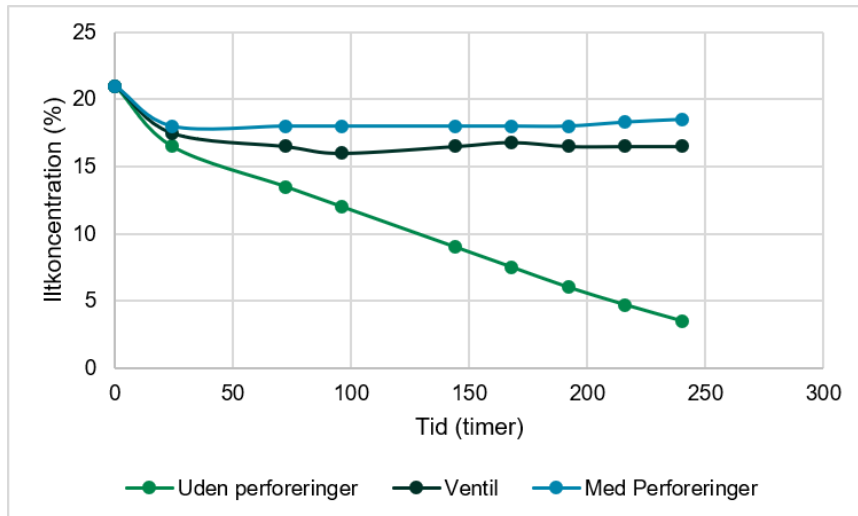
Til verificering af ventilløsningens funktionalitet anvendes rucolasalat pakket i den fremstillede emballage med ventilløsning. Sammen med den udviklede emballage med ventilløsning testes en perforeret emballage (samme antal perforeringer som ved ventilløsningen) uden ventil og en emballage uden perforeringer ved hhv. 5 °C og ved 23 °C.



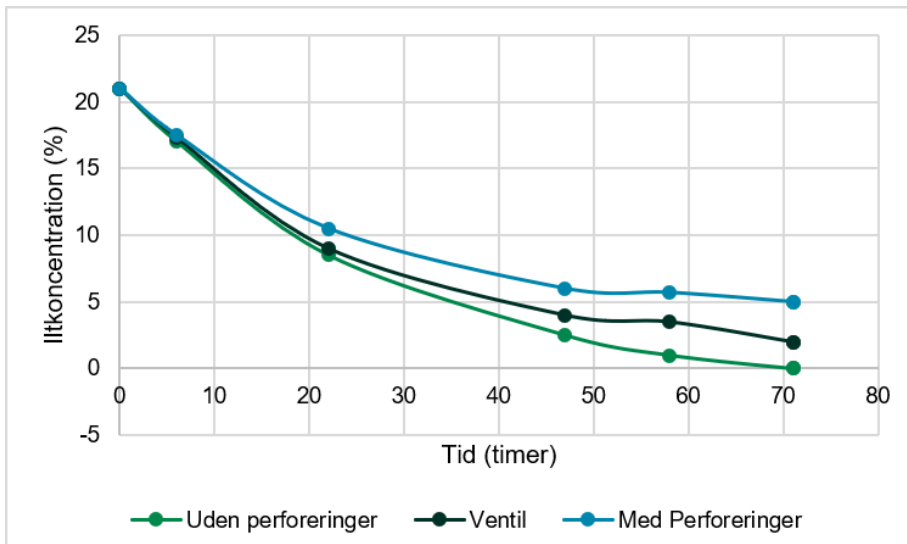
**FIGUR 15.** Rucola emballeret med i folie med ventilløsning.

Ilt- og kuldioxidkoncentrationen i emballagen måles løbende og anvendes til vurdering af ventilens funktionalitet.

Hvis ventilen er 100% effektiv, vil den ved 5 °C være lukket og iltkoncentrationen i emballagen vil svare til iltkoncentrationen i en BOPP-emballage uden perforeringer. Ved 23 °C forventes det ifølge teorien, at ventilen er åben og iltkoncentrationen i emballagen svarer til iltkoncentrationen i en BOPP-emballage med perforeringer.

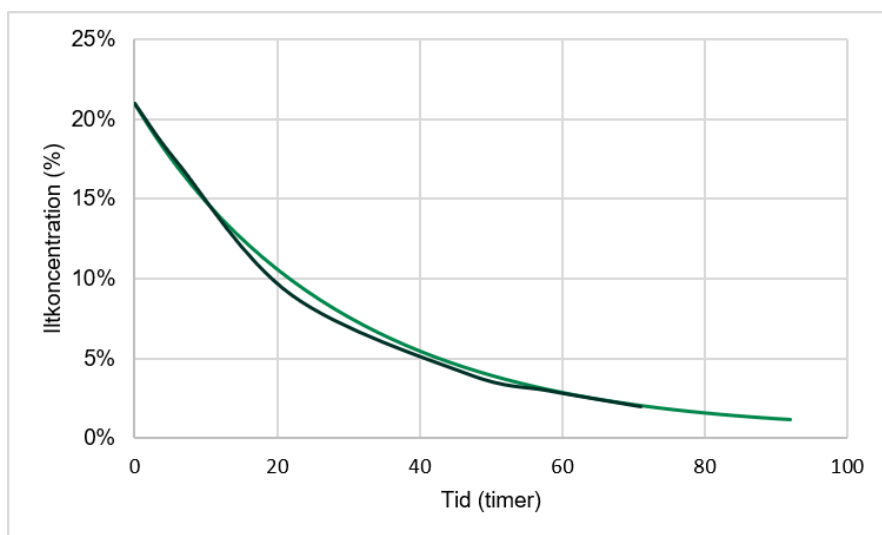


**FIGUR 16.** Test af rucola emballeret i BOPP uden perforeringer, BOPP med perforeringer og BOPP med ventilløsning ved 5 °C



**FIGUR 17.** Test af rucola emballeret i BOPP uden perforeringer, BOPP med perforeringer og BOPP med ventilløsning ved 23 °C.

Ved tilpasning af den teoretiske model, findes kurverne, der svarer til kurverne fra de praktiske forsøg. Herved kan OTR bestemmes for de tre testede folier med rucolasalat.



**FIGUR 18.** Tilpasning af den målte iltkoncentration for ventilløsningen med en teoretisk kurve (23 °C) .

Resultaterne viser desuden, at respirationshastighed er højere end den fundet ved respirationsforsøg i glas ved 23 °C. Dette viser, at der er variationer i respirationshastigheden. Hvis ventilen skal fungere optimalt, skal  $RR_{23}/RR_5 = OTR_{23}/OTR_5$  ligge mellem 5,7 (fundet ved respirationsforsøg) og 7,7 (fundet ved pakkeforsøg), men resultaterne viser, at  $OTR_{23}/OTR_5$  er 1,6. Det viser, som det ses af kurverne, at ventilen ikke fungerer optimalt.

**TABEL 7.** OTR-værdier for emballagen anvendt til forsøg med rucolasalat.

	OTR (uden perforeringer) (ml/(emballage*dag*atm))	OTR (med perforeringer) (ml/(emballage*dag*atm))	OTR (ventilløsning) (ml/(emballage*dag*atm))
5 °C	42	912	628
23 °C	190	1172	1011

**TABEL 8.** ventilens effektivitet

	Rucolaforsøg
$RR_{23}/RR_5$	7,7 (5,7 fra RR-forsøg)
$OTR_{23}/OTR_5$	1,6



## 5. Konklusion

Valideringen viser, at den fremstillede temperaturstyret ventil er implementerbar og fungerer, men resultatet af implementeringen er ikke så god som forventet, da den praktiske kapacitet af den producerede emballage med indbygget ventil er cirka 20 procent af den forventede.

Målingerne viser, at ventilen i forhold til den perforerede pose er 86 % åben, hvilket betyder, at ligevægts iltkoncentrationen opstår ved ca. 2 % ilt, hvilket er meget tæt på den kritiske værdi, hvor der kan ske skader på plantevævet. OTR for emballagen med ventil burde ved 5 °C ligge mellem 131 og 177 ml/(emballage\*dag\*atm), men ligger på 628 ml/(emballage\*dag\*atm) og det viser, som det også kan ses på kurven, at ventilen næsten ikke lukker ved 5 °C og at iltkoncentrationen og dermed respirationshastigheden i emballagen er højere end den burde være.

En af årsagerne til, at ventilen ikke fungerer som forventet for pakkede produkter, kan skyldes at folien er fleksibel og at posens overflade derfor ikke var plan. Posens ikke plane overflade besværliggør den tætte kontakt mellem topfolien og matrixfolien, som er nødvendig for at ventilen kan lukke og kan også være skyld i at ventilen ikke kan åbne helt. En anden årsag til den manglende effektivitet kan også være variationer i temperatur under produktion, hvor ventilens prædeformation er afhængig af den omgivende temperatur.

Da ventilen ikke virker efter hensigten, er det ikke muligt at vurdere ventilens indflydelse på holdbarheden.

## 6. Referencer

1. Miljøministeriet, Regeringens Strategi for affaldsforebyggelse "Danmark uden affald II" - tal fra 2015
2. Miljøstyrelsen, rapporten "Food waste prevention in Denmark - Identification of hotspots and potentials with Life Cycle Assessment" - tal fra 2017
3. Stewart, R. F., Mohr, J. M., Budd, E. A., Phan, L. X., and Arul, J. Temperature-Compensating Films for Modified Atmosphere Packaging of Fresh Produce. Polymeric Delivery Systems. Chapter 16. *ACS Symposium Series* 520 (1993) 232-243. DOI: 10.1021/bk-1993-0520.ch016.
4. Landau, L. D., Pitaevskii, L. P., Lifshitz, E.M., Kosevich, A. M. Theory of Elasticity, Third Edition: Volume 7 (Theoretical Physics), Chapter 2. The Equilibrium of Rods and Plates.
5. Saltveit M.E. (2003b). Is it possible to find an optimal controlled atmosphere? *Post-harvest Biology and Technology* 27, 3-13.
6. Kader A.A. *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. University of California, Agriculture and Natural Resources. Third edition, 2002.

### **Temperaturstyret luftventil til frugt- og grøntemballage - TEMPVENT**

Formålet med dette projekt er at reducere spildet af frisk frugt og grønt i detailledet og hos forbrugeren og dermed reducere klimabelastningen. Det skal gøres ved udvikle og implementere en temperaturstyret luftventil, der kan sikre opretholdelsen af en optimal modificeret atmosfære i emballage med frisk frugt og grønt, selvom temperaturen varierer.

For at kompensere for temperaturudsving og brudte kølekæder ved distribution, salg og transport af frisk frugt og grønt, er det helt centralt at få udviklet en perforeret emballagefilm, der er relativt lukket ved 0-5 °C, hvor produktets iltforbrug er lavt, men som kan åbne sig ved forhøjede temperaturer, hvor produktets iltforbrug er højt. Formålet med dette projekt er at videreudvikle og implementere en temperaturstyret ventil, der kan sikre opretholdelsen af en optimal modificeret atmosfære i emballering til frisk frugt og grønt, ved varierende temperaturer.

Valideringen viser, at den fremstillede temperaturstyret ventil er implementerbar og fungerer, men resultatet af implementeringen er ikke så god som forventet, da den praktiske kapacitet af den producerede emballage med indbygget ventil er cirka 20 procent af den forventede.



Miljøstyrelsen  
Tolderlundsvej 5  
5000 Odense C

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)