

BORCUD

*Erfgoed als Inspiratie: Een Energiezuinig Koel- en
Bevochtigingssysteem voor Kleinschalige Landbouw*

Salma Abed Ali Abdel Jalil

Promoters: Els Dubois en Dries Verbruggen



Productontwikkeling
Universiteit Antwerpen

بسم الله الرحمن الرحيم

Dankwoord

Een masterproef schrijven wordt vaak gezien als een individuele prestatie, maar hoe verder ik dit traject bewandelde, hoe meer ik besepte dat geen enkele reis alleen wordt afgelegd. Onderweg waren er mensen die richting gaven wanneer het pad onduidelijk werd, die mij vooruitduwden wanneer ik vastzat en die mee hebben gebouwd aan het resultaat dat vandaag voor u ligt.

Daarom wil ik eerst God bedanken, die mij heeft gezegend met zoveel bijzondere mensen op mijn pad. Zonder hun steun, kennis, vertrouwen en aanwezigheid zou deze masterproef nooit mogelijk zijn geweest.

Mijn oprechte dank gaat uit naar mijn promotor, Els Dubois. Van het eerste idee tot de laatste pagina heeft zij mij begeleid, ondersteund en aangemoedigd. Haar betrokkenheid en vertrouwen vormden een vaste leidraad doorheen dit traject.

Daarnaast wil ik mijn copromotor, Dries Verbruggen, bedanken voor zijn waardevolle feedback en inzichten. Wanneer ik dreigde te verdwalen in de vele ideeën en mogelijkheden, herinnerde hij mij eraan waarom ik ooit aan deze thesis was begonnen.

Een bijzonder woord van dank gaat ook naar mijn medestudenten Eva en Iris. Bijna wekelijks kwamen we samen om te brainstormen, elkaar verder te helpen en nieuwe energie te vinden wanneer iemand vastzat. Bedankt voor alle gesprekken, ideeën en steun.

Verder wil ik alle experts, geïnterviewden en professionals bedanken die hun tijd en kennis met mij hebben gedeeld. Hun inzichten vormden een belangrijke bouwsteen voor deze masterproef.

Ook wil ik mijn vrienden bedanken voor hun mentale steun, wijze raad en de vele gesprekken die mij doorheen mijn academische jaren hebben geholpen.

Aan mijn familie en gezin: bedankt voor jullie onvoorwaardelijke steun, geduld en geloof in mij. Jullie hebben mij op mijn beste en moeilijkste momenten gezien en stonden altijd klaar wanneer ik jullie nodig had.

Tot slot wil ik mijn vader bedanken. Bedankt dat je het licht in mij zag toen ik het zelf nog niet kon zien. Door jouw geloof en vertrouwen heb ik geleerd datzelfde licht ook in mezelf te herkennen. Dat is een geschenk dat veel verder reikt dan deze masterproef.

Wanneer ik terugkijk op dit traject, besef ik hoe gezegend ik ben met de mensen die ik onderweg heb mogen ontmoeten. Voor ieder van hen ben ik oprecht dankbaar.

Blessed by God.

Abstract

Voedselverlies na de oogst vormt een belangrijke uitdaging binnen de landbouwsector. Alleen al in de Europese landbouw gaat jaarlijks ongeveer 90 miljoen ton voedsel verloren, waarbij kleinschalige landbouwers vaak het hardst getroffen worden. Conventionele koelsystemen zijn voor hen vaak te duur, energie-intensief en moeilijk toegankelijk.

Deze masterthesis onderzoekt hoe traditionele koeltechnieken, zoals verdampingskoeling en thermische regulatie met klei, gecombineerd kunnen worden met moderne technologie om een betaalbaar, duurzaam en energie-efficiënt bewaarsysteem te ontwikkelen. Het resultaat is Boroud, een modulair hybride koelsysteem dat passieve koelprincipes combineert met actieve koeling en digitale monitoring via een mobiele applicatie.

Het ontwerp werd ontwikkeld op basis van literatuuronderzoek, experteninterviews, veldobservaties, CFD-simulaties en materiaalstudies. Boroud bestaat uit een centrale watertoren en modulaire koelunits, waarbij elke unit afzonderlijk kan worden afgestemd op de optimale bewaarcondities van een specifiek gewas.

De resultaten tonen aan dat Boroud ongeveer 52% energie-efficiënter is per liter opslagcapaciteit dan een klassieke koelcel, zonder bijkomende infrastructuur. Daarnaast werd onderzocht hoe traditionele Arabische en Perzische ontwerpprincipes kunnen bijdragen aan de identiteit van het product, als aanvulling op de technische ontwikkeling.

Deze thesis toont aan dat de combinatie van traditionele kennis en moderne technologie een haalbare strategie vormt voor het ontwikkelen van duurzame, toegankelijke en energie-efficiënte bewaaroplossingen voor kleinschalige landbouwers. Boroud illustreert hoe erfgoedtechnieken kunnen bijdragen aan innovatieve oplossingen voor hedendaagse uitdagingen binnen de landbouwsector.

Analyse

Introducti	P. 7
Analyse van traditionele	P. 11
Analyse van gewassen	P. 17
Gebruikerscontext	P.19
Moderne koeltechnieken	P. 20
Synthese	P. 22
Productdefinitie	P. 23
What's next?	P. 36

Productvoorstelling

Toegevoegde waarde	P.86
User journey	P. 88
User journey - onderhoud	P. 89
Renders	P. 90
Terugkoppling	P. 92
Look and feel	P. 94

Systeemfase

Kritische analyse van het concept en verfijning van de ontwerprichting	P. 30
Brainstorming	P. 33
Schema	P. 34
Prototyping	P. 30
Productarchitectuur	P. 43
Synthese van de prototypefase	P.44

Businessplan

Context	P.100
Marktgrootte	P. 102
Businessmodel	P. 104
Financiering	P. 106

Proof of Concept

User journey met feedback boer	P.48
Verificatie	P. 50
Materiaalkeuze en wandopbouw	P. 53
De zeerpot-wand als koelend element	P. 55
Energieverbruik	P. 63
CFD-simulatie van Boroud	P. 65
Temperatuur en vochtigheid per unit	P. 67
Ergonomie: kratten optillen	P. 68

Bijlage

Detail

Branding	P.72
Afmetingen en details van Boroud	P. 74
Exploded view	P. 76
Interface flow	P. 80

Referentie

Analyse

An abstract graphic design featuring a spiral staircase on the right side, rendered in a dark, textured brown color. A large, circular, textured red shape is positioned behind the word 'Analyse'. A thin, curved line sweeps across the middle of the page, passing behind the word. The background is a light, warm beige color.



Introductie

Oude beschavingen ontwikkelden technieken die in harmonie werkten met de omgeving en efficiënt omgingen met beschikbare grondstoffen, wat waardevolle lessen biedt voor de duurzaamheidsuitdagingen van vandaag (Nartey, 2025). Een van die uitdagingen is voedselverlies. Verliezen na de oogst zijn verantwoordelijk voor bijna 40% van de totale voedselverspilling, voornamelijk als gevolg van ontoereikende opslagomstandigheden (Choudhary et al., 2023). Moderne oplossingen steunen sterk op mechanische koeling, die verantwoordelijk is voor 15% van het wereldwijde elektriciteitsverbruik en 10% van de uitstoot van broeikasgassen (IEA, 2018).

Dit onderzoek bestudeert hoe de kennis en materiaalgebonden praktijken van vroegere samenlevingen uit verschillende regio's en culturen kunnen bijdragen aan het ontwerp van een duurzaam en energie-efficiënt koelsysteem voor kleinschalige boeren. Door historische technieken zoals verdampingskoeling en thermische regulatie met klei te combineren met hedendaagse ontwerpstrategieën, beoogt de studie een hybride systeem te ontwikkelen dat de versheid van gewassen langer behoudt en tegelijkertijd het energieverbruik beperkt. Daarbij wordt onderzocht hoe erfgoed, materiaal kennis en moderne toepassingen kunnen samenkomen in een klimaatresponsieve en milieuvriendelijke bewaar technologie.

Probleemstelling



Honger, een van de belangrijkste Duurzame Ontwikkelingsdoelstellingen, lijkt soms een ver-van-ons-bedprobleem, maar treft nog steeds miljoenen mensen wereldwijd. Het aanpakken ervan draait niet alleen om het produceren van meer voedsel, maar ook om het verminderen van verliezen in de voedselketen: de geleidelijke en vaak onzichtbare verliezen die optreden tussen productie en consumptie (FAO Safe Food Initiative).

Zelfs in Europa is voedselverspilling aanzienlijk. Samen met delen van Zuid-Amerika behoort de regio tot de gebieden met de hoogste niveaus van voedselverlies (Gustavsson et al., 2011). Binnen de Europese Unie vindt bijna 40% van deze verliezen plaats tijdens de verwerkingsfase, voornamelijk als gevolg van inefficiënties in beheer en behandeling, waardoor voedsel verloren gaat nog vóór het de consument bereikt (Buchner et al., 2012).

Vooraf vers groenten en fruit zijn kwetsbaar na de oogst. Slechte opslagomstandigheden, zoals een verkeerde temperatuur of een te lage luchtvochtigheid, kunnen ertoe leiden dat 30 tot 50% van de groenten verloren gaat voordat ze worden geconsumeerd (Sipho & Tilahun, 2020). Koeling verlengt de houdbaarheid aanzienlijk, maar gaat gepaard met een hoog energieverbruik: ongeveer 15% van de wereldwijde elektriciteitsproductie wordt gebruikt voor koeling, met zowel economische als ecologische gevolgen.

De standaardkoelkast van 4 °C vormt echter slechts een compromis en houdt geen rekening met de specifieke behoeften van verschillende gewassen. Groenten en fruit hebben elk hun eigen ideale bewaaromstandigheden, wat het belang benadrukt van nauwkeurige, doordachte en energiezuinige oplossingen voor voedselbewaring (Holsteijn & Kemna, 2018).

Oppertuiniteit



Deze uitdagingen tonen aan dat er nog veel ruimte is voor innovatie binnen de naooogstbewaring. Moderne koelsystemen zijn vaak duur en energie-intensief, wat bijdraagt aan hoge verliezen en de economische mogelijkheden van boeren beperkt (Sipho & Tilahun, 2020; Oluwasola, n.d.). Traditionele bewaarmethoden bevatten dan weer een schat aan lokale kennis, maar missen vaak de consistentie die nodig is om de kwaliteit van gewassen betrouwbaar te behouden (Saagoto & Chowdhury, 2025).

De grote diversiteit aan groenten en fruit benadrukt dit potentieel nog verder. Klassieke koeling op 4 °C houdt geen rekening met de optimale bewaartemperaturen van verschillende gewassen, die kunnen variëren van -1 °C tot +17 °C (Holsteijn & Kemna, 2018). Door opslagomstandigheden af te stemmen op het specifieke gewas kan de houdbaarheid twee tot drie keer verlengd worden, waardoor bederf aanzienlijk afneemt.

Ook de controle van de luchtvochtigheid speelt een cruciale rol. In veel opslagruimtes ligt de relatieve luchtvochtigheid lager dan aanbevolen, wat leidt tot vochtverlies, verwelking en een lagere marktwaarde van de producten (Sipho & Tilahun, 2020; Wucher et al., 2021). Een nauwkeurige regeling van de luchtvochtigheid helpt gewassen langer vers te houden.

Daarnaast biedt ook energiebeheer belangrijke kansen. Het optimaliseren van luchtstromen, stapelmethode en ventilatorgebruik kan het elektriciteitsverbruik met 40 tot 50% verminderen en tegelijk de bewaarkwaliteit verbeteren (Bakker et al., n.d.). Samen wijzen deze inzichten op de noodzaak van een betaalbaar en energie-efficiënt bewaarsysteem dat inspelt op de specifieke behoeften van elk gewas, voedselverliezen vermindert en de duurzaamheid van kleinschalige landbouwbedrijven versterkt.

Context analyse

Landbouw ondersteunt al duizenden jaren de menselijke beschaving, maar moderne industriële landbouw slaagt er vaak niet in haar meest fundamentele doel volledig te vervullen: mensen voeden. Nog steeds gaat een aanzienlijke hoeveelheid voedsel verloren doorheen de volledige voedselketen (Nartey, 2025). Volgens het rapport No Time to Waste van Feedback EU (2022) wordt er jaarlijks ongeveer 153,5 miljoen ton voedsel verspild in de Europese Unie, waarvan 89,8 miljoen ton (Figuur1) afkomstig is uit de primaire productie, met andere woorden de landbouw.

Ook in Vlaanderen zijn deze verliezen aanzienlijk. De sector verliest naar schatting 348.786 ton voedsel per jaar, een stijging van 16% ten opzichte van 2015. Daarvan is 310.944 ton afkomstig uit de tuinbouwsector. Technische problemen tijdens het oogsten, sorteren en bewaren spelen een belangrijke rol in deze verliezen (Braekvelt et al., 2020).

Het verminderen van naoogstverliezen vereist efficiënte bewaar technieken, waarbij koeling een cruciale rol speelt. Tegelijk stijgt het energieverbruik binnen de landbouwsector. In 2021 verbruikte de Vlaamse landbouw 32,16 PJ netto primaire energie, een stijging van 28% ten opzichte van 2012. Deze toename is voornamelijk het gevolg van verdere mechanisatie en het groeiende gebruik van koelsystemen op landbouwbedrijven. Bij een elektriciteitsprijs van €0,25/kWh komt dit neer op een jaarlijkse energiekost van ongeveer €2,23 miljard (CE Monitor, 2021).

Vooral kleinschalige landbouwbedrijven ondervinden moeilijkheden om conventionele koelsystemen te implementeren. Met een gemiddelde bedrijfsoppervlakte van 16 hectare zijn de investerings- en energiekosten vaak te hoog, terwijl grotere bedrijven gemakkelijker gebruik kunnen maken van geavanceerde bewaar technieken zoals Controlled Atmosphere-cellen (Bakker et al., n.d.). Dit benadrukt de nood aan toegankelijke, betaalbare en energiezuinige bewaar systemen die inspelen op de noden van diverse en kleinschalige landbouwbedrijven (Sipho & Tilahun, 2020; Defraeye et al., 2023).

Onderzoeksbenadering

Een veelbelovende aanpak ligt in de lessen die we kunnen halen uit traditionele architectuur. Architecten grijpen vaak terug naar historische kennis om gebouwen te ontwerpen die comfort, efficiëntie en een harmonie met de omgeving combineren. Een voorbeeld hiervan is de moderne windvanger op het dak van het Royal Chelsea Hospital in Londen, die aantoont hoe een techniek uit een ander klimaat succesvol kan worden aangepast aan een nieuwe context (Sirror, 2024, p. 11). Dergelijke strategieën kunnen ook inspiratie bieden voor de ontwikkeling van nieuwe producten.

Traditionele koelmethoden maakten vaak gebruik van verdamping. Zuiver verdampingsgekoelde systemen presteren echter minder goed in omgevingen met een hoge luchtvochtigheid en behalen vaak temperaturedalingen van minder dan 4 °C (Saagoto & Chowdhury, 2025; Sipho & Tilahun, 2020). Hybride systemen, waarbij verdampingskoeling bijvoorbeeld wordt gecombineerd met ontvochtiging, kunnen deze beperking verminderen en energiezuinige koeling mogelijk maken gedurende het hele jaar (Sipho & Tilahun, 2020, p. 10; Sirror, 2024, pp. 19, 23).

Voor veel gewassen is een hogere luchtvochtigheid net wenselijk, iets wat het Belgische klimaat van nature kan bieden. Traditionele architectuur bevat bovendien tal van passieve technieken voor verwarming, koeling en waterbeheer (Nartey, n.d., p. 5). Door deze principes aan te passen aan hedendaagse toepassingen kunnen energiezuinige bewaar systemen ontwikkeld worden die zowel inspelen op de behoeften van gewassen als gebruikmaken van lokale klimaatomstandigheden en historische kennis.



90 miljoen ton

voedselverlies enkel in de
landbouwsector in EU

Figuur 1: Voedselverlies



Onderzoeksaanpak

Deze thesis heeft als doel een fysiek systeem te ontwikkelen dat kleinschalige boeren ondersteunt bij het bewaren van hun oogst na de oogstperiode. Daarbij worden traditionele koeltechnieken gecombineerd met moderne verbeteringen om de bewaaromstandigheden van gewassen te optimaliseren. De onderzoeksaanpak richt zich op het begrijpen van het volledige traject van gewasverwerking, van oogst tot opslag, en op het identificeren van mogelijkheden om na oogstverliezen te verminderen.

Het onderzoek bouwt voort op zowel historische kennis over energiezuinige bewaar technieken als op de praktische realiteit van hedendaagse kleinschalige landbouw. Door inzichten uit literatuuronderzoek, veldobservaties en expertenkennis te combineren, wordt gezocht naar ontwerpcriteria voor een modulair en energie-efficiënt koelsysteem dat afgestemd is op de specifieke behoeften van verschillende gewassen. Een schematisch overzicht van deze onderzoeksaanpak wordt weergegeven in Figuur 2.

Methodologie

De methodologie combineert literatuuronderzoek, deskresearch, veldobservaties en semigestructureerde interviews met boeren om inzicht te krijgen in huidige bewaarmethoden voor gewassen en de uitdagingen waarmee landbouwers geconfronteerd worden. Daarnaast werden experts geraadpleegd om te onderzoeken hoe traditionele technieken, zoals verdampingskoeling en kleigebaseerde opslag, kunnen worden gecombineerd met moderne koeltechnologieën.

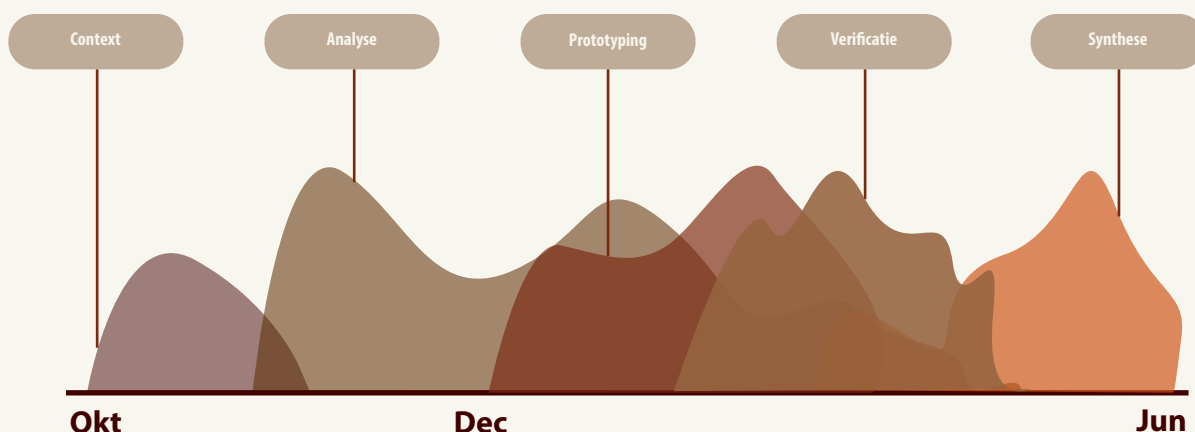
De inzichten uit deze verschillende onderzoeksmethoden werden samengebracht om de productdefinitie op te stellen, ontwerpcriteria vast te leggen en de verdere ontwikkeling van het systeem te sturen. Op die manier werd verzekerd dat het uiteindelijke ontwerp zowel technisch haalbaar is als aansluit bij de praktische behoeften van kleinschalige boeren.

De inzichten uit deze verschillende onderzoeksmethoden werden samengebracht om de productdefinitie op te stellen, ontwerpcriteria vast te leggen en de verdere ontwikkeling van het systeem te sturen. Op die manier werd verzekerd dat het uiteindelijke ontwerp zowel technisch haalbaar is als aansluit bij de praktische behoeften van kleinschalige boeren.

Inspiratie uit traditie

Dit onderzoek begon niet met een methode of een model, maar met een vonk: een enkele uitspraak van architect Hassan Fathy. Zijn woorden: “When the full power of human imagination is backed up by the weight of a living tradition, the resulting work of art is far greater than any artist can achieve when he has no tradition to work in or when he willfully abandons his tradition” (Fathy, 1973), openden een deur. Ze werkten als een draad die uit een eeuwenoud tapijt werd getrokken en lagen van kennis, herinneringen en betekenis blootlegde.

Het werk van Fathy blijft tot vandaag inspireren, ver voorbij de grenzen van architectuur of kunst, en raakt aan iets fundamenteel menselijks (Asma Khattab, 2012). In een tijd waarin de wereld voortdurend vooruit lijkt te streven en de sporen van traditionele beschavingen steeds vaker verdwijnen achter de snelheid van technologische innovatie (Nartey, 2025), vormen zijn woorden een belangrijke herinnering. Ze tonen dat het verleden geen afgesloten hoofdstuk is, maar een bron van kennis. In de herinneringen van vroegere beschavingen schuilen technieken, principes en inzichten die ook vandaag nog richting kunnen geven aan hedendaagse uitdagingen.



Figuur 2: Onderzoeksaanpak

Eeuwenoude kennis over koeling



Figuur 3: Verdampingskoeling in Egypte

Traditionele koeling

Om hedendaagse energiezuinige koeling beter te begrijpen, is het waardevol om te kijken naar hoe vroegere beschavingen comfort creëerden zonder gebruik te maken van machines. Veel culturen ontwikkelden klimaatgevoelige technieken die gebruikmaakten van lucht, water en natuurlijke materialen, waarbij verdampingskoeling vaak een centrale rol speelde.

Het oude Egypte is hiervan een goed voorbeeld. Poreuze aardewerken potten, bevochtigde oppervlakken en gecontroleerde luchtstromen werden ingezet om verdamping te stimuleren en zo de temperatuur te verlagen (figuur 3).

Gelijkaardige technieken ontstonden ook in andere delen van de wereld en werden doorheen de eeuwen verder verfijnd. Deze historische kennis vormt een waardevolle basis voor het ontwerpen van moderne koelsystemen die energiezuinig zijn en inspelen op hun omgeving.

Zeerpot

Vroegere beschavingen hadden geen toegang tot elektriciteit, maar slaagden er toch in om de houdbaarheid van gewassen te verlengen dankzij ingenieuze bewaartechnieken. Een bekend voorbeeld hiervan is de pot-in-pot cooler, beter bekend als de zeerpot. Hoewel deze techniek haar oorsprong vindt in oude tradities, werd ze in de jaren 1990 opnieuw geïntroduceerd in Nigeria als een goedkope en elektriciteitsvrije methode om voedsel langer te bewaren (Oluwasola, n.d.).

Werking

De zeerpot (figuur 4) maakt volledig gebruik van het natuurlijke proces van verdamping en heeft geen elektriciteit nodig om te functioneren. Het systeem bestaat uit een kleinere kleipot die in een grotere kleipot geplaatst wordt, waarbij de ruimte tussen beide potten wordt opgevuld met vochtig zand of aarde. Dit zand fungeert als een tussenlaag die de verdamping bevordert en zo de koelprestaties van het systeem maximaliseert (Olaifa O. Peter et al., 2018).

Koeling en bewaring

Doordat warmte voortdurend aan het systeem wordt onttrokken, daalt de temperatuur in de binnenste pot doorgaans met 5 tot 15 °C, afhankelijk van de omgevingsluchtvochtigheid en de aanwezige luchtstroming. Deze lagere temperatuur remt microbiële activiteit af en verlengt zo de houdbaarheid van de opgeslagen producten (Oluwasola, n.d.; Choudhary & Dewangan, 2023).

In de praktijk wordt de binnenste pot vaak afgedekt met een vochtige doek of een isolerend deksel. Dit verbetert de prestaties van het systeem door warmte-instraling te beperken en vochtverlies te verminderen. De zeerpot toont aan hoe traditionele kennis met minimale materialen en zonder externe energiebron toch een doeltreffende temperatuurregeling kan realiseren.

Prestaties van verdampingskoeling in verschillende klimaten

Warm en droog klimaat

In droge regio's met hoge temperaturen en een lage luchtvochtigheid presteert de zeerpot het best. Veldtesten in de Afrikaanse Sahel, onder andere in Mali en Rwanda, tonen aan dat pot-in-pot-systemen de binnentemperatuur met 5 tot 15 °C kunnen verlagen (Rehman et al., 2020). In de Sudan- en Sahelsavanne van Noord-Nigeria werden zelfs temperatuurdalingen tot 12 °C gemeten (Oluwasola, n.d.).

Warm en vochtig klimaat

Een hoge luchtvochtigheid beperkt de verdamping en daarmee ook het koelend effect. Tijdens het moessonseizoen in Dhaka ($\approx 33,5$ °C, RV >65%) bedroeg de temperatuurdaling slechts 2,75 tot 3,90 °C (Saagoto & Chowdhury, 2025). Dit komt overeen met andere studies die aantonen dat verdampingskoeling weinig effect heeft bij een relatieve luchtvochtigheid boven 60 à 65% (Sipho & Tilahun, 2020).

Koud en vochtig klimaat

In koele en vochtige klimaten (12–13 °C, RV 70–95%) is het temperatuurverschil tussen de omgeving en de natteboltemperatuur beperkt. Daardoor is er weinig drijvende kracht voor verdamping en neemt het koelend vermogen van de zeerpot sterk af (Ryhl-Svendsen & Smedemark, 2024).

België

Het Belgische klimaat (gemiddeld ongeveer 10 °C en een relatieve luchtvochtigheid van ongeveer 80%) beperkt het potentieel van verdampingskoeling. Tegelijk liggen de natuurlijke buitentemperaturen dicht bij de ideale bewaartemperaturen van veel gewassen. Waar in warme en droge klimaten sterke verdamping nodig is om geschikte opslagtemperaturen te bereiken, biedt het koelere Belgische klimaat van nature al gunstigere omstandigheden voor het bewaren van groenten en fruit.



Figuur 4: Zeerpot

Capillaire werking

Het vocht in het zand wordt via capillaire werking door de poreuze kleiwanden opgenomen en naar het oppervlak van de pot getransporteerd.

Verdamping

Wanneer dit water het buitenoppervlak van de buitenste pot bereikt, verdampt het naar de omringende lucht. Tijdens deze verdamping wordt latente warmte onttrokken aan de kleipot en aan de opgeslagen inhoud, waardoor het systeem afkoelt (Saagoto & Chowdhury, 2025).

Houdbaarheid

Hoewel verdampingskoeling duidelijk aantoont dat de temperatuur kan worden verlaagd, blijft de belangrijkste vraag of deze techniek ook daadwerkelijk de houdbaarheid van gewassen verlengt. Mohammed Bah Abba, de moderne herontdekker en verspreider van het pot-in-pot-koelsysteem, voerde de eerste praktijktesten uit in Noord-Nigeria met aubergines, paprika's en Afrikaanse spinazie (figuur 5). Deze testen toonden aan dat de houdbaarheid van bederfelijke producten aanzienlijk en succesvol kon worden verlengd dankzij het gebruik van het systeem (Oluwasola, n.d.).



Figuur 5: Groenten in Zeerpot

Efficient Evaporative Cooling



Figuur 6: Experimenten geschilderde potten

Ongeglazuurde pot

De ongeglazuurde klei laat water vrij verdampen, waardoor het water in de pot afkoelt.

Geschilderde pot

De verflaag sluit de poriën van de klei af, waardoor minder water kan verdampen en het koelend effect afneemt.

Bovenste helft geschilderde pot

Door enkel de bovenste helft van de pot te schilderen blijft het koelend effect bijna even groot als bij een volledig ongeverfde pot, terwijl het waterverlies met 73% afneemt.

Onderste helft geschilderde pot

Aangezien water een essentiële rol speelt bij verdampingskoeling, is het belangrijk om het waterverbruik te beperken zonder het koelend effect te verliezen. Choudhary en Dewangan (2023) onderzochten daarom de invloed van het schilderen van kleipotten. Hun resultaten tonen aan dat volledig geschilderde potten nauwelijks nog verdamping toelaten, waardoor de watertemperatuur stijgt. Ongeverfde potten behalen daarentegen de hoogste koelprestaties (figuur 6).

Wanneer enkel de bovenste helft van de pot werd geschilderd, bleef het koelend effect vrijwel gelijk aan dat van een volledig ongeverfde pot. Tegelijk daalde het waterverlies met 73%, waardoor de pot veel minder vaak moest worden bijgevuld (Choudhary & Dewangan, 2023).

Gangina

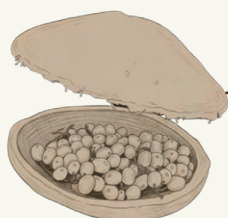


Figuur 7: Hoe wordt gangina gemaakt?

Gangina

In Afghanistan worden druiven tot zes maanden na de oogst bewaard met behulp van de gangina, een traditionele bewaarstechniek waarvan de naam letterlijk “schat” betekent. Deze methode ontstond in droge regio's zonder toegang tot koeling en weerspiegelt eeuwen aan lokale kennis en ervaring (Hejazi et al., 2022).

De techniek maakt gebruik van een compacte opslagcontainer opgebouwd uit twee lagen aarde die wordt afgesloten met verse modder (figuur 7). Druivenrassen met een dikkere schil, zoals de Taifi-druif, zijn hiervoor het meest geschikt. Met deze methode kunnen druiven tot zes maanden vers blijven zonder gebruik te maken van elektriciteit (Hejazi et al., 2022).



Figuur 8: Binnenkant Gangina

Werking

De kleiwanden houden vocht vast, terwijl de ondergrondse plaatsing helpt om druiven langdurig vers te bewaren zonder elektriciteit (Groklopedia, n.d.).

De luchtdichte kleikamer verlaagt het zuurstofgehalte en verhoogt de hoeveelheid koolstofdioxide, waardoor rijping en bederf worden vertraagd (Groklopedia, n.d.).



Figuur 9: Gangina en styrofoam

Traditioneel vs. modern

Hejazi et al. (2022) vergeleken gangina-opslag met piepschuimdozen voor het bewaren van Taifi-druiven gedurende 50 dagen (figuur 9). Beide systemen vertoonden sterke eigenschappen. De piepschuimdozen beperkten het gewichtsverlies tot 14%, terwijl dit bij gangina 34% bedroeg. Daartegenover stond dat gangina het bederf veel beter wist te beperken, met een bederfpercentage van slechts 12% tegenover 45% bij piepschuimdozen. De resultaten tonen aan dat piepschuim geschikt is voor transport en het beperken van vochtverlies, terwijl gangina uitblinkt in het langdurig bewaren van druiven met een lager risico op bederf.

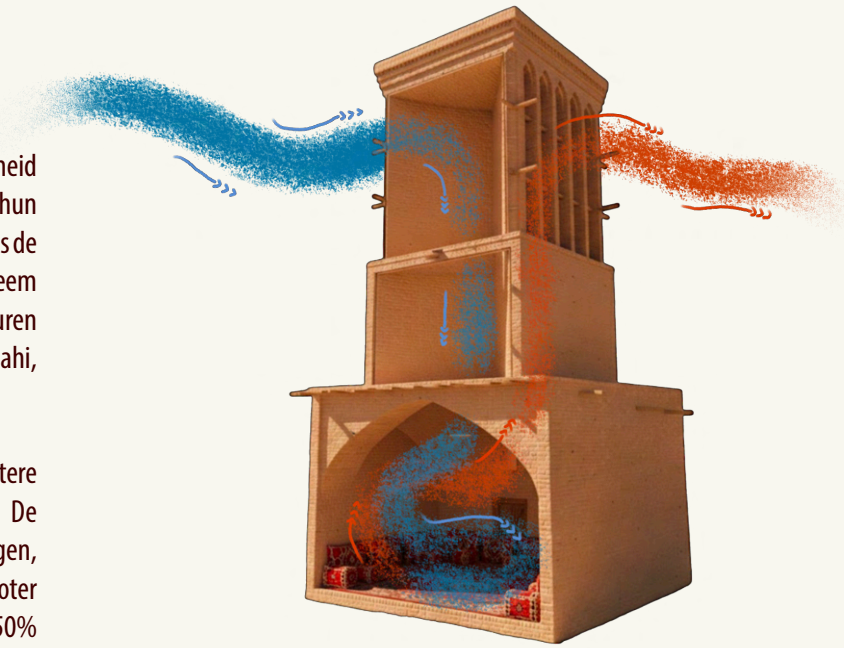
Badgir : windtoren

Tijdens het onderzoek naar hoe oude beschavingen de houdbaarheid van voedsel verlengden, is het ook waardevol om te kijken naar hun architecturale kennis. Een van de bekendste voorbeelden hiervan is de Perzische badgir of windvanger (figuur 10), een passief koelsysteem dat gebruikmaakt van natuurlijke ventilatie om binnentemperaturen te verlagen zonder mechanische energie (Sangdeh & Nasrollahi, 2022; Sirror, 2024).

Windvangers zijn bijzonder efficiënt omdat ze veel grotere drukverschillen creëren dan gewone gevelopeningen. De drukcoëfficiënt aan de luchtinlaat kan tot drie keer hoger liggen, waardoor luchtsnelheden ontstaan die ongeveer driemaal groter zijn. Moderne varianten met zijwanden kunnen bovendien tot 50% meer verse lucht aanvoeren (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).

Werking

Om te begrijpen hoe een windvanger werkt, is het nuttig om naar de luchtstroming binnen het systeem te kijken (figuur 11). De belangrijkste drijvende kracht is de wind, die een veel sterker effect heeft dan thermische opstijging of buoyancy (Sangdeh & Nasrollahi, 2022). Wanneer er wind aanwezig is, vangt de opening aan de windzijde de lucht op en leidt deze naar beneden door de schacht (Roaf, n.d.). Door de hoge drukverschillen die een windvanger creëert, kunnen luchtsnelheden tot drie keer hoger liggen dan bij gewone gevelopeningen (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).



Figuur 11 : Werking badgir

Moderne varianten met zijwanden versterken dit effect nog verder en kunnen tot 50% meer verse lucht aanvoeren. Tegelijkertijd werkt de opening aan de lijzijde als uitlaat, waardoor warme binnenlucht wordt afgevoerd (Roaf, n.d.). Windvangers met één opening functioneren het best in gebieden met een constante windrichting, terwijl meerzijdige windvangers beter geschikt zijn voor wisselende windomstandigheden (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).

Wanneer de wind afneemt, schakelt het systeem over op thermische opstijging. Warme binnenlucht stijgt op door de schacht en trekt koelere lucht naar binnen. Dankzij deze twee mechanismen zorgen windvangers voor een continue ventilatie en kunnen ze de binnentemperatuur met 3 tot 5 °C verlagen (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).

In droge klimaten verbeteren windvangers daarnaast de luchtkwaliteit door geuren af te voeren (Roaf, n.d.). In combinatie met verdampingskoeling kan de relatieve luchtvochtigheid in de gekoelde ruimte bovendien met 35,8% toenemen ten opzichte van de omgeving, tot waarden tussen 71,4% en 90,7% (Sangdeh & Nasrollahi, 2022; Azene, Workneh, & Woldetsadik, 2011).



Figure 11: Windcatcher in Yazd, Persia

Moderne toepassing

De principes van de traditionele windvanger kunnen ook worden aangepast aan moderne klimaatomstandigheden. In het Verenigd Koninkrijk werd de klassieke windvanger verder ontwikkeld tot een ventilatietoren met ventilatorondersteuning, waardoor het systeem ook bij lage windsnelheden blijft functioneren. Voorbeelden hiervan zijn te vinden in het Royal Chelsea Hospital (Figuur 12) in Londen en de Seaside School in Lancing, waar kleine ventilatoren verse lucht aanzuigen en vervuilde binnenlucht afvoeren (Sirror, 2024).

In het gematigde Britse klimaat worden vaak meerzijdige torens met verstelbare lamellen toegepast. Deze regelen de druk aan de luchtinlaat en voorkomen tegelijk dat regen het systeem binnendringt (Sirror, 2024; Sangdeh & Nasrollahi, 2022). Praktijkvoorbeelden tonen aan dat deze systemen voldoende ventilatie bieden, de CO₂-concentratie binnenshuis met tot 50% kunnen verlagen en tijdens de zomer de binnentemperatuur iets onder de buitentemperatuur houden (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).



Figuur 12: Royal Chelsea Hospital

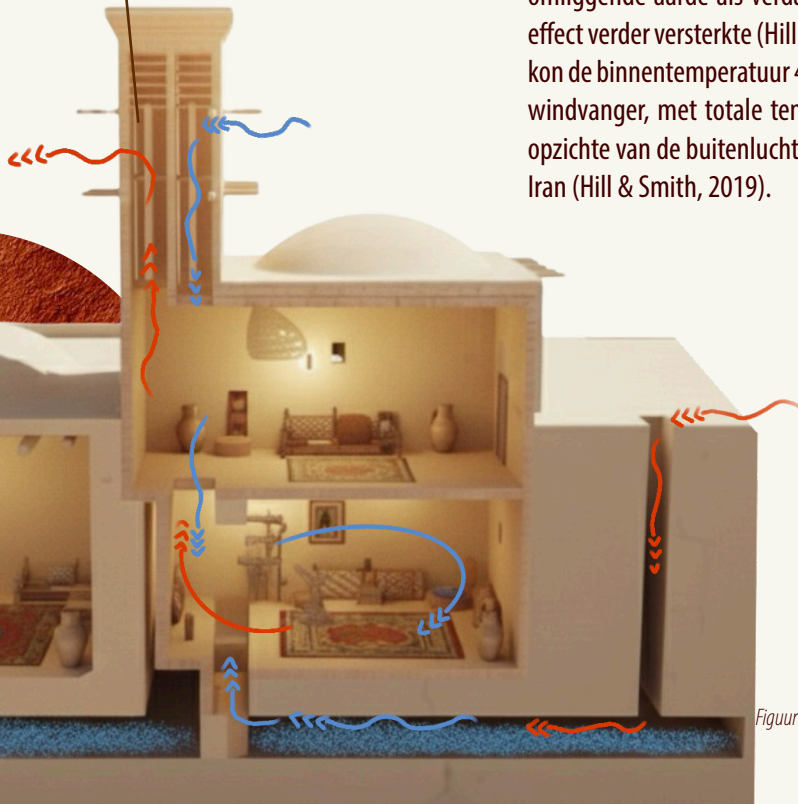
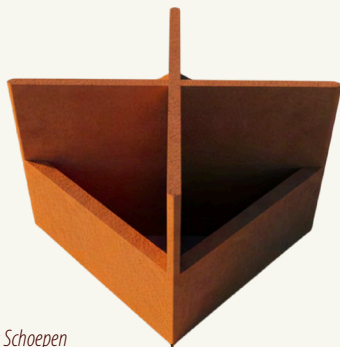
Impact van X-vormige schoepen op de luchtstroom

Onderzoek van Sangdeh en Nasrollahi (2022) toont aan dat X-vormige schoepen in windvangers (figuur 13) de luchtstroom efficiënter maken. Door hun vorm ontstaat minder turbulentie en een groter drukverschil, waardoor meer lucht wordt aangezogen. Dit resulteert in hogere lichtsnelheden, betere ventilatie en een groter koelend effect (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).

Windtoren with Qanat

In grotere woningen werd de windvanger vaak gecombineerd met een ondergronds waterkanaal of **qanat** (figuur 17). De badgir ving de wind op en leidde deze langs het koele water van de qanat, waardoor de lucht afkoelde en bevochtigd werd (Roaf, n.d.). Tijdens haar traject vond zowel warmte-uitwisseling met het water en de omliggende aarde als verdampingskoeling plaats, wat het koelend effect verder versterkte (Hill & Smith, 2019). Dankzij deze combinatie kon de binnentemperatuur 4 tot 6 °C lager liggen dan bij een gewone windvanger, met totale temperatuurdalingen van 10 tot 13 °C ten opzichte van de buitenlucht in het hete, droge klimaat van Centraal-Iran (Hill & Smith, 2019).

Figuur 13: Schoepen



Figuur 17: Badgir met qanat

Analyse: gewassen

De grote diversiteit aan tuinbouwgewassen vraagt om bewaaromstandigheden die afgestemd zijn op hun specifieke fysiologische eigenschappen. Toch werken conventionele koelsystemen meestal met één standaardtemperatuur van ongeveer 4 °C, terwijl de optimale bewaartemperaturen van groenten en fruit kunnen variëren van –1 °C tot +17 °C (Holsteijn & Kemna, 2018).

Deze uniforme aanpak houdt onvoldoende rekening met het feit dat gewassen na de oogst biologisch actief blijven. Elk gewas heeft zijn eigen metabolisme en reageert anders op temperatuur. Door de opslagomstandigheden beter af te stemmen op deze behoeften kunnen naooogstverliezen worden verminderd en blijven smaak, voedingswaarde en kwaliteit langer behouden.

Opslagsystemen met meerdere klimaatzones of gewasspecifieke compartimenten bieden hiervoor een veelbelovende oplossing. Ze maken het mogelijk om binnen één systeem verschillende temperatuur- en vochtigheidscondities te creëren, waardoor zowel de energie-efficiëntie als de bewaarkwaliteit worden verbeterd.



Figure 15:
temperatuur

Effect van temperatuurverlaging

Temperatuur	0°C	10°C	20°C
ml CO ₂ /kg.h	6 tot 10	25 tot 50	50 tot 100
houdbaarheid (dagen)	7 tot 14	3 tot 5	2 tot 3

Tabel 1: Temperatuur

Het verlagen van de temperatuur is de belangrijkste factor voor het bewaren van verse groenten en fruit, omdat het de fysiologische processen die verantwoordelijk zijn voor bederf rechtstreeks vertraagt (Dai et al., 2025). Daarom is bewaring bij lage temperatuur de meest toegepaste methode om de metabolische activiteit van gewassen te verminderen en hun houdbaarheid te verlengen (Ziv & Fallik, 2021).

In figuur 15 wordt de aardbei weergegeven als voorbeeld van een zeer kwetsbaar fruit waarvoor temperatuurverlaging essentieel is. Zonder koeling blijven aardbeien slechts één tot twee dagen houdbaar. Zoals te zien is in tabel 1 verlaagt een lagere temperatuur de ademhalingsnelheid (uitgedrukt in ml CO₂/kg.h), waardoor de houdbaarheid aanzienlijk toeneemt (Mitcham & Crisosto, 1996).

• **Vertraging van het metabolisme:** Lagere temperaturen vertragen de interne stofwisselingsprocessen. Voor elke temperatuurdaling van 10 °C vermindert de metabolische activiteit met een factor 1 tot 4 (Wucher et al., 2021).

• **Remming van enzymatische processen:** Lage temperaturen onderdrukken enzymen die betrokken zijn bij bederf, zoals polyfenoloxidase, en verminderen de productie van ethyleen (Dai et al., 2025).

• **Behoud van kwaliteit:** Koeling voert veldwarmte af, beperkt vochtverlies en helpt fysiologische afwijkingen te voorkomen, vooral wanneer ze wordt gecombineerd met voorkeeling (Dai et al., 2025).

Figuur 16: Chill Injury in Tomaten



Koudeschade (Chilling Injury)

Een lagere bewaar temperatuur verlengt niet altijd de houdbaarheid. Tomaten die onder hun optimale bewaar temperatuur van 10–12 °C worden bewaard, kunnen last krijgen van koudeschade (Chilling injury) (figuur 16) (Suslow & Cantwell, 1997; Pristijono et al., 2017; Siphon & Tilahun, 2020).

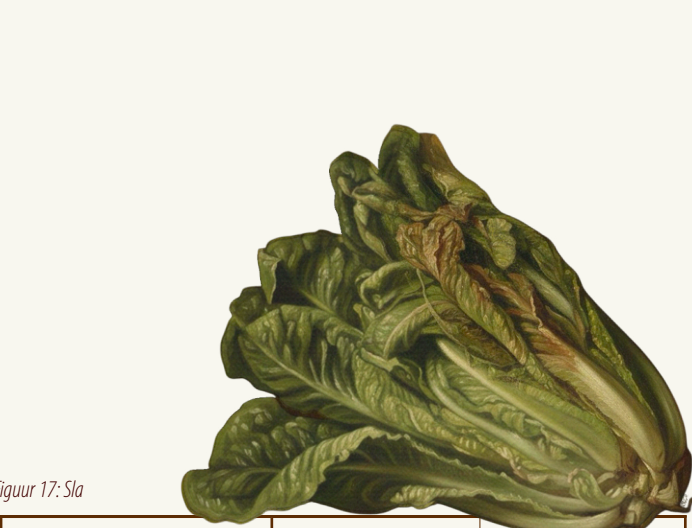
Koudeschade vertraagt de rijping, vermindert de smaak en verhoogt de gevoeligheid voor schimmels. Daarom verschilt de optimale bewaar temperatuur per rijpheidsstadium: groene tomaten worden best bewaard bij 13–21 °C, terwijl rode tomaten beter bewaard worden bij 8–10 °C (Tao et al., 2024; Duret et al., 2025).

Ventilatie en luchtcirculatie

Een goede luchtcirculatie is essentieel voor het behoud van de kwaliteit van opgeslagen groenten en fruit. Luchtstroming voert warmte, vocht en koolstofdioxide af die door de gewassen worden geproduceerd en helpt zo om temperatuur en luchtvochtigheid gelijkmatig te houden (Bakker et al., n.d.).

Daarnaast voorkomt ventilatie dat de lucht verzadigd raakt met vocht, waardoor schimmelvorming en bederf worden beperkt (Vanhellemont, n.d.; Broucke, n.d.). Ook gassen zoals ethyleen worden afgevoerd, wat de rijping vertraagt en de houdbaarheid van de producten verlengt (Fang & Wakisaka, 2021). Een goed ontworpen ventilatiesysteem draagt daardoor rechtstreeks bij aan een langere bewaartermijn en een betere productkwaliteit.

Relatieve luchtvochtigheid



Figuur 17: Sla

RH (%)	95-98	70- 72
houdbaarheid (dagen)	20	5

Tabel 2: Sla

Naast temperatuur speelt ook de relatieve luchtvochtigheid een belangrijke rol bij het bewaren van groenten en fruit. Een hoge luchtvochtigheid beperkt vochtverlies door verdamping, wat een van de belangrijkste oorzaken is van kwaliteitsverlies tijdens opslag (Babu et al.; Sipho & Tilahun, 2020).

Door de luchtvochtigheid tussen 85 en 95% te houden, blijft het gewichtsverlies beperkt en blijven textuur, smaak, uiterlijk en voedingswaarde beter behouden (Prange & Wright, 2023; Holsteijn & Kemna, 2018). Zelfs een vochtverlies van 3 tot 6% kan al zichtbare verwelking veroorzaken (Sipho & Tilahun, 2020).

Een studie naar de bewaring van sla (figuur 17) toont dit duidelijk aan (tabel 2). Bij een relatieve luchtvochtigheid van 70–72% daalde de houdbaarheid met 75% ten opzichte van optimale omstandigheden. Bij een luchtvochtigheid van 95–98% bleef de kwaliteit daarentegen veel langer behouden en bleef de sla zelfs na 20 dagen nog aanvaardbaar (Agüero, 2011).

Controlled atmosphere (CA)



Figuur 18: CA in Apples

Bij Controlled Atmosphere (CA)-bewaring wordt de opslagruimte afgesloten en wordt de samenstelling van de lucht aangepast door het zuurstofgehalte te verlagen en het koolstofdioxidegehalte te verhogen (Babu et al., n.d.; Fang & Wakisaka, 2021).

Deze techniek vertraagt de ademhaling, ethyleenproductie en rijping van gewassen, waardoor de houdbaarheid aanzienlijk toeneemt (Babu et al., n.d.). Daarnaast remt een verhoogde CO₂-concentratie de groei van schimmels af, terwijl een laag zuurstofgehalte helpt om de stevigheid van vruchten zoals appels langer te behouden (Beaudry, 1999; Ziv & Fallik, 2021).

Een studie naar appelrassen uit Kashmir (figuur 18) toont aan dat CA-bewaring de houdbaarheid aanzienlijk kan verlengen. Waar appels bij omgevingsomstandigheden 60 tot 75 dagen houdbaar bleven en in koelopslag 110 tot 170 dagen, kan een optimaal ingestelde gecontroleerde atmosfeer de bewaartermijn verlengen tot ongeveer 10 maanden (Wani et al., 2024; Mitcham & Crisosto, 1999).

Een verkeerde instelling van de atmosfeer kan echter leiden tot kwaliteitsproblemen. Te weinig zuurstof kan anaerobe ademhaling veroorzaken, terwijl een te hoog CO₂-gehalte fysiologische schade kan veroorzaken bij verschillende fruitsoorten (Babu et al., n.d.; Fang & Wakisaka, 2021).

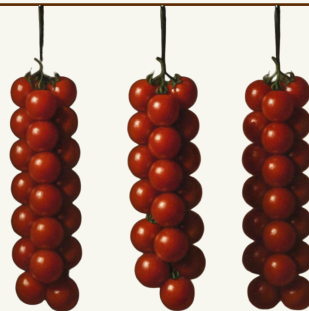
Een blik op het leven van een kleinschalige boer

Om de uitdagingen rond oogstbewaring beter te begrijpen, werden interviews afgenomen met boeren die ongeveer 7.000 m² landbouwgrond beheren en meer dan 200 verschillende gewassen telen. Hieruit bleek dat actieve koeling zelden wordt gebruikt vanwege de hoge investerings- en energiekosten. Verschillende boeren gaven bovendien aan de voorkeur te geven aan eenvoudige en duurzame oplossingen boven complexe technologie.

De meeste gewassen worden bewaard in schuren of kelders. Traditionele Belgische bewaarkelders zijn nog steeds in gebruik, terwijl sommige boeren gebruikmaken van inkuilen. Deze methode is echter niet geschikt voor alle gewassen, omdat knaagdieren regelmatig schade veroorzaken. Vooral bladgroenten blijken kwetsbaar en verliezen snel kwaliteit door verwelking en uitdroging.

Daarnaast passen boeren verschillende traditionele bewaarstechnieken toe. Zo worden zoete aardappelen bewaard in zand, worden gewassen afgedekt met vochtige doeken en wordt de Italiaanse Pomodori da appendere-methode gebruikt om tomaten op te hangen en hun houdbaarheid te verlengen (figuur 19).

Een bijkomende uitdaging is dat verschillende gewassen niet samen bewaard mogen worden. Door plaatsgebrek worden echter vaak compromissen gesloten. De grote diversiteit aan gewassen maakt bewaring bovendien complex, omdat betrouwbare informatie over optimale opslagomstandigheden niet altijd gemakkelijk beschikbaar is. Hoewel het Postharvest Research and Extension Center hiervoor duidelijke richtlijnen aanbiedt, zou het volgen ervan meerdere aparte koelsystemen vereisen, wat voor de meeste kleinschalige boeren niet haalbaar is.



Figuur 19: Pomodori da appendere

Een van de geïnterviewde boeren werkte met een wekelijks groenteabonnement waarbij de gewassen elke vrijdag werden geoogst en dezelfde dag door de klanten werden opgehaald. Hierdoor was langdurige opslag meestal niet nodig, behalve wanneer een klant zijn groentepakket enkele dagen later kwam ophalen. Producten die wel langer werden bewaard waren onder andere aardappelen, uien, pompoenen en courgettes, omdat deze in grote hoeveelheden worden geoogst of van nature een langere houdbaarheid hebben.

De boer gaf aan dat pompoenen en courgettes bewust op de onderste rekken werden geplaatst. Wanneer deze gewassen beginnen te rotten, kunnen ze openbarsten. Door ze onderaan te bewaren wordt voorkomen dat andere producten beschadigd raken.

Om de dagelijkse werking beter te begrijpen, werd deelgenomen aan een oogstdag op het bedrijf (figuur 20). De gewassen werden geoogst en in kratten verzameld, waarna ze naar de schuur werden gebracht. Sommige kratten werden afgedekt met vochtige doeken om de luchtvochtigheid te behouden. Vervolgens stelde de boer de groentepakketten samen en gaf hij klanten advies over hoe ze de verschillende gewassen thuis het best konden bewaren.

werd deelgenomen aan
een oogstdag

wekelijks
groenteabonnement



Figuur 20: Interview

Gewassen werden ingewikkeld in
een vochtige doek

Omstandigheden op de opslaglocatie

Omstandigheden in de kelder

Om te beoordelen of de opslagomstandigheden geschikt zijn voor het bewaren van gewassen, werd gekeken naar de ruimtes waarin de geïnterviewde boeren hun producten opslaan. Eén van de boeren bewaarde haar oogst in een kelder waar aan het einde van de herfst een temperatuur van 15 °C en een relatieve luchtvochtigheid van 35% werd gemeten. In deze ruimte werden onder andere appels opgeslagen, terwijl de optimale bewaaromstandigheden voor appels rond 0 °C en 90–95% relatieve luchtvochtigheid liggen. Zowel de temperatuur als de luchtvochtigheid weken dus sterk af van de aanbevolen waarden.

Een studie van Gallein (2005) naar de kelder van de Boekentoren toont vergelijkbare omstandigheden. Tijdens de winterschommelende relatieve luchtvochtigheid tussen 25% en 45%, waarbij deze gedurende meer dan de helft van de winterperiode onder 25% lag en 11% van de tijd zelfs onder 20% daalde. In de zomer werd slechts een relatieve luchtvochtigheid van ongeveer 54% bereikt. Natuurlijk geventileerde en onverwarmde kelders behouden doorgaans een temperatuur van ongeveer 10 tot 15 °C gedurende het hele jaar (Vanhellemont & Laboratorium Renovatie en Erfgoed, z.d.). Voor gewassen zijn deze omstandigheden minder geschikt, omdat ze leiden tot vochtverlies, gewichtsverlies, verwelking en een versnelde achteruitgang van de productkwaliteit.

Omstandigheden in de schuur

Bij een andere boer werden aardappelen, uien, pompoenen en courgettes opgeslagen in een schuur waar een temperatuur van 16 °C werd gemeten. De luchtvochtigheid werd niet rechtstreeks gemeten, maar volgens Winkel et al. (2022) bedraagt de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid in landbouwschuren ongeveer 67%.

Voor pompoenen zijn dit bijna ideale omstandigheden. Zij worden het best bewaard bij een temperatuur van 12,5–15 °C en een relatieve luchtvochtigheid van ongeveer 60%, gecombineerd met voldoende ventilatie (Cantwell & Suslow, 1998). Voor aardappelen liggen de optimale omstandigheden echter rond 7 °C en 98% relatieve luchtvochtigheid (Suslow & Voss, 1998). Hoewel de schuur dus geschikt is voor het bewaren van pompoenen, zijn de omstandigheden minder gunstig voor aardappelen, die hierdoor sneller vocht verliezen, kunnen uitlopen en kwaliteitsverlies vertonen.

Moderne actieve koeling

Positieve koelruimte

Tijdens de interviews gaven verschillende boeren aan geïnteresseerd te zijn in actieve koeling, maar tegelijk bezorgd te zijn over de hoge investerings- en energiekosten. Om deze kosten beter te begrijpen, werd een standaard koelcel onderzocht. Een typische koelcel van ongeveer 12 m³ kost tussen €5.000 en €12.000 en verbruikt gemiddeld ongeveer 1.500 W (Iceshop, z.d.).

Bij continu gebruik en een elektriciteitsprijs van €0,25/kWh bedraagt het jaarlijkse energieverbruik:

$$1.500 \text{ W} \times 24 \text{ h/dag} \times 365 \text{ dagen/jaar} = 13.140 \text{ kWh/jaar}$$

$$13.140 \text{ kWh/jaar} \times €0,25/\text{kWh} = €3.285 \text{ per jaar}$$

Naast de hoge aankoopprijs brengt een klassieke koelcel dus ook een aanzienlijke jaarlijkse energiekost met zich mee.

Hoewel een koelcel een effectieve bewaarmethode is, blijft de vraag of ze voor alle gewassen de optimale omstandigheden biedt. Koelcellen werken doorgaans met één vaste temperatuur, meestal rond 4 °C. Zoals eerder besproken heeft elk gewas echter zijn eigen ideale bewaaromstandigheden. Een temperatuur die geschikt is voor het ene gewas kan minder geschikt of zelfs schadelijk zijn voor een ander gewas.

Daarnaast ligt de relatieve luchtvochtigheid in klassieke koelcompartimenten vaak tussen 22 en 50% (Wucher et al., 2021), terwijl de meeste groenten en fruit een veel hogere luchtvochtigheid vereisen. Dit kan leiden tot vochtverlies, verwelking en een versnelde achteruitgang van de productkwaliteit.

Een mogelijke oplossing is het toevoegen van een bevochtiger aan de koelcel. Dergelijke systemen zijn verkrijgbaar vanaf ongeveer €2.000 en kunnen helpen om een geschiktere luchtvochtigheid te behouden. Hoewel dit de bewaarkwaliteit verbetert, blijft het fundamentele probleem bestaan: één opslagruimte kan niet tegelijkertijd de optimale temperatuur- en vochtigheidscondities bieden voor meerdere gewassen met verschillende bewaarvereisten.

Gecontroleerde atmosfeer (CA)

Klimacterische vruchten zoals appels en tomaten blijven na de oogst verder rijpen door de productie van ethyleen. Om dit proces te vertragen, worden de ademhaling en ethyleenproductie verminderd door het zuurstofgehalte te verlagen en het koolstofdioxidegehalte te verhogen. Dit principe wordt toegepast in Controlled Atmosphere (CA)-bewaring.

Hoewel deze techniek zeer effectief is, gaat ze gepaard met hoge investerings- en energiekosten. CA-systemen kosten doorgaans tussen €60.000 en €120.000. Een standaardcel van 98 ton vereist ongeveer 99 W koelvermogen per ton, wat neerkomt op een vermogen van 9,7 kW. Bij een elektriciteitsprijs van €0,25/kWh resulteert dit in een maandelijkse energiekost van ongeveer €1.746 (Bakker, Bons, & Sterling, n.d.).

CA-bewaring is daardoor voornamelijk haalbaar voor grote bedrijven. Bovendien kan één CA-cel slechts één gecontroleerde atmosfeer tegelijk aanbieden, waardoor het systeem vooral geschikt is voor één gewas. Voor kleinschalige boeren met een grote diversiteit aan gewassen is dit vaak geen praktische oplossing.

Janny MT-systeem

Een alternatief voor de dure Controlled Atmosphere (CA)-bewaring is het ****Janny MT-systeem****, dat gebruikmaakt van een selectief membraan in het deksel van een opslagcontainer (figuur 21). Na de oogst worden de producten eerst gekoeld tot de gewenste bewaartemperatuur. Vervolgens wordt het deksel geplaatst, waardoor een afgesloten opslagomgeving ontstaat.

Binnen de container blijven de gewassen ademen. Het membraan laat langzaam zuurstof binnen en voert koolstofdioxide af, waardoor beide gassen zich automatisch stabiliseren op lage concentraties. Hierdoor vertraagt de ademhaling van het gewas aanzienlijk en wordt de houdbaarheid verlengd (Mt, z.d.). Tegelijk zorgt de afgesloten container voor een hoge relatieve luchtvochtigheid en beperkt ze gewichtsverlies.

In tegenstelling tot klassieke CA-opslag zijn geen complexe installaties nodig. De modules hebben een levensduur van meer dan 15 jaar en de membranen hoeven niet vervangen te worden. Het systeem biedt daardoor een eenvoudiger en goedkoper alternatief voor het verlengen van de houdbaarheid van verse producten (Mt, z.d.).

Theoretische bewaartijd bij 10 °C in CA

We willen inschatten hoe lang appels theoretisch bewaard kunnen worden bij 10 °C onder een aanbevolen CA-atmosfeer van 1–2% O₂ en 2–4% CO₂. Bij 0 °C kunnen appels onder dezelfde atmosfeer tot ongeveer 10 maanden bewaard worden (Crisosto & Mitcham, 1999).

De ademhalingssnelheid van appels stijgt sterk wanneer de temperatuur toeneemt. Meestal verdubbelt of verdrievoudigt deze bij elke stijging van 10 °C ($Q_{10} \approx 2-3$) (Defraeye et al., 2023). Wanneer de ademhalingssnelheid hoger wordt, wordt de bewaartijd korter. Wanneer de ademhalingssnelheid lager wordt, wordt de bewaartijd langer.

Bij 0 °C en 2% O₂ + 2–4% CO₂ bedraagt de bewaartijd ongeveer 10 maanden. Bij 10 °C ligt de ademhalingssnelheid 2 tot 3 keer hoger. Daardoor wordt de theoretische bewaartijd:

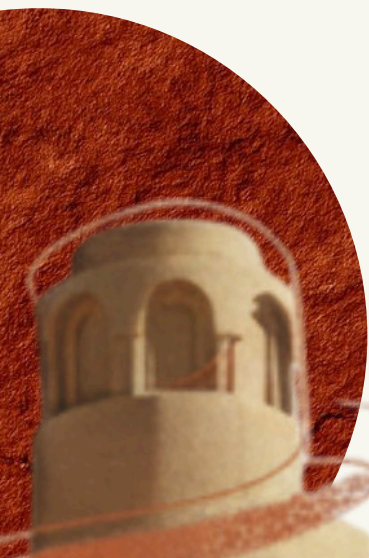
Bij een verdubbeling van de ademhalingssnelheid daalt de theoretische bewaartijd van 10 naar ongeveer 5 maanden. Wanneer de ademhalingssnelheid verdrievoudigt, vermindert de bewaartijd tot ongeveer 3,3 maanden.

Gemiddeld komt dit neer op ongeveer 4 maanden theoretische bewaring bij 10 °C.

Deze berekening blijft een ruwe inschatting. Bij 10 °C liggen de ademhalingssnelheden van appels tussen 5 en 40 µL/kg·h (Crisosto & Mitcham, 1999), wat aanzienlijk hoger is dan bij 0 °C. Daarom moet experimenteel getest worden of het selectieve membraan van de Janny MT-module bij deze ademhalingsintensiteit nog het gewenste evenwicht tussen zuurstof en koolstofdioxide kan behouden.



Figuur 21: Janny MT Storage Module



Synthese

Productdefinitie

Een duurzaam en energiezuinig bewaarsysteem voor kleinschalige boeren die een grote diversiteit aan gewassen telen. Het systeem combineert traditionele technieken van verdampingskoeling met eenvoudige moderne technologieën om stabiele bewaaromstandigheden te creëren met een minimaal elektriciteitsverbruik.

Elk gewas wordt opgeslagen in een afzonderlijke unit waarin temperatuur, luchtvochtigheid en luchtcirculatie afgestemd kunnen worden op de specifieke behoeften van het product. Door deze gecontroleerde microklimaten verlengt het systeem de houdbaarheid van gewassen, vermindert het naooogstverliezen en verlaagt het de energiekosten voor de boer.

Duurzaamheid

Het systeem maakt gebruik van passieve, energiezuinige koeling om het elektriciteitsverbruik te beperken, stabiele bewaaromstandigheden te behouden en naooogstverliezen te verminderen.

Traditie

Het systeem vertaalt traditionele koelprincipes uit de zeerpot, qanat en windvanger naar een moderne, energiezuinige hybride oplossing voor het bewaren van gewassen.

Design drivers

Gewasoptimalisatie

Elk gewas krijgt aangepaste bewaaromstandigheden via afzonderlijke compartimenten, zodat koeling gericht wordt ingezet waar nodig. Hierdoor wordt de houdbaarheid verlengd en voedselverspilling verminderd.

Gebruiksvriendelijkheid

Het modulaire ontwerp kan worden aangepast aan verschillende landbouwsituaties en combineert eenvoudige componenten, optionele functies en duidelijke indicatoren voor een flexibel en gebruiksvriendelijk systeem.

Gecontroleerde atmosfeer (CA)

Zoals eerder werd aangetoond, werkt verdampingskoeling het meest efficiënt in warme en droge klimaten. Tijdens een interview met een boerin werd echter vastgesteld dat haar kelder een relatieve luchtvochtigheid van 35% en een temperatuur van 15°C had. Om het koelpotentieel van verdampingskoeling onder deze omstandigheden te bepalen, werd de natteboltemperatuur berekend. De natteboltemperatuur is de laagste temperatuur die theoretisch bereikt kan worden door verdamping alleen en vormt daardoor de maximale koelgrens van een verdampingsgekoeld systeem. Op basis van de gemeten temperatuur en luchtvochtigheid werd met onderstaande formule een natteboltemperatuur van 7,7 °C berekend.

$$\begin{aligned} T_w = & T \arctan(0.151977\sqrt{RH} + 8.313659) \\ & + 0.00391838\sqrt{RH^3} \arctan(0.023101RH) \\ & - \arctan(RH - 1.676331) \\ & + \arctan(T + RH) \\ & - 4.686035 \end{aligned}$$

Wanneer de inzichten uit dit onderzoek worden samengebracht, ontstaat een duidelijke ontwerpvisie waarin de biologie van gewassen, de praktijk van de boer en traditionele koeltechnieken elkaar versterken. Het voorgestelde systeem behandelt elk gewas als een waardevol product en voorziet daarom modulaire opslagunits met bewaaromstandigheden die afgestemd kunnen worden op de specifieke behoeften van het gewas.

Het systeem maakt voornamelijk gebruik van watergedreven processen en vertaalt traditionele principes van verdampingskoeling naar een praktische en gebruiksvriendelijke oplossing voor de boer. Dankzij een eenvoudig bijvulstelsysteem en een indicator die waarschuwt wanneer producten risico lopen op bederf, ondersteunt het systeem de dagelijkse werking van de boer zonder complexe technologie of hoge energiekosten.

Zeerpot

Elke opslagunit werkt volgens hetzelfde principe als een mini-zeerpot, waarbij poreuze kleiwanden en een waterlaag zorgen voor verdampingskoeling. Afhankelijk van het gewas verschilt de benodigde koelcapaciteit. Tomaten vereisen slechts een beperkte temperatuurdaling en hebben daardoor minder verdampingsoppervlak nodig, terwijl bladgroenten zoals sla een grotere verdampingsoppervlakte vereisen om een sterkere koeling te realiseren.

Compartimenten die een sterkere koeling vereisen, kunnen indien nodig worden ondersteund met actieve koeling. De warmte die hierbij vrijkomt, wordt niet afgevoerd maar hergebruikt voor gewassen die juist een iets hogere temperatuur nodig hebben. Op die manier ontstaat een gesloten systeem waarin warmte en koelte efficiënt worden verdeeld. Door thermische energie te hergebruiken, wordt het elektriciteitsverbruik beperkt en stijgt de energie-efficiëntie van het systeem.



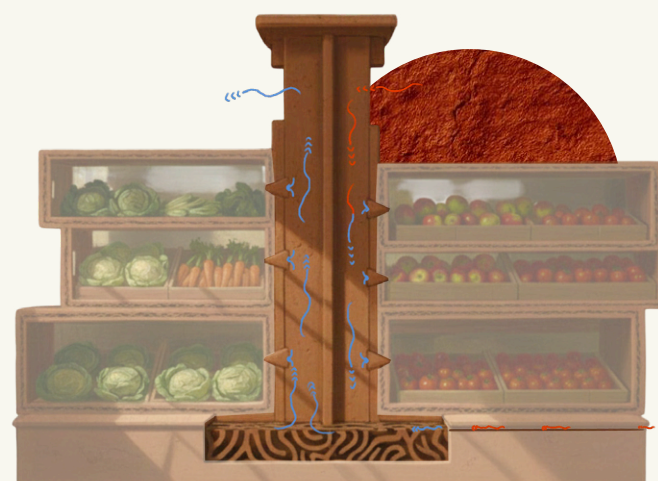
Figuur 21: Concept voorstel - Coolunit



Figuur 22: Compartimenten

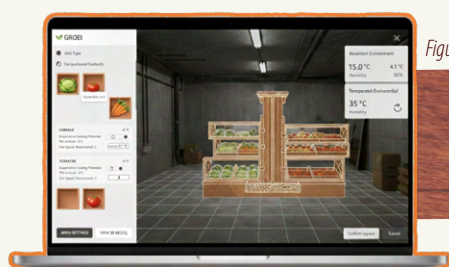
Passive Controlled Atmosphere

Boeren kunnen de houdbaarheid van hun gewassen aanzienlijk verlengen door gebruik te maken van een plug-and-play Janny MT-module met selectieve membranen. Voor verschillende gewassen zijn specifieke deksels beschikbaar die afgestemd zijn op hun ademhalingsgedrag. In de zomer worden producten eerst afgekoeld tot ongeveer 10–15 °C in een kelder of koele ruimte, waarna het membraan wordt geplaatst. In de winter kunnen gewassen vaak eerst buiten worden gekoeld voordat de module wordt afgesloten. Door de module mee te verplaatsen met de seizoensgebonden temperatuurverschillen kunnen optimale bewaaromstandigheden worden behouden en wordt de houdbaarheid verder verlengd.



Figuur 23: Ventilatie in coolunit

Configureer je koelunit



Figuur 24: App

Boeren kunnen online ingeven welke gewassen ze willen bewaren. Het systeem berekent vervolgens het koelpotentieel, stelt de optimale plaatsing voor en schat het extra energieverbruik van eventuele actieve koeling. Sensoren volgen temperatuur en luchtvochtigheid op en zorgen voor handmatige of automatische regeling van de bewaaromstandigheden.

Slimme bewaargids



De app toont de optimale bewaaromstandigheden per gewas, stelt geschikte gewascombinaties voor en waarschuwt bij risico op bederf. Daarnaast biedt ze traditionele bewaartips, terwijl een eenvoudige indicator op de unit de resterende houdbaarheid weergeeft.

Deel, leer en verkoop



De app bevat een communityforum waar boeren bewaartips en ervaringen kunnen uitwisselen. Daarnaast kunnen producten die bijna bederven via een marktplaats tegen een lagere prijs worden aangeboden aan lokale kopers, waardoor voedselverspilling afneemt en de boer toch nog extra inkomsten kan genereren.

What's next?

De vorige fase bestond uit kwalitatief onderzoek, waarbij alle nodige informatie werd verzameld om het ontwerp te onderbouwen voordat testen en verificatie plaatsvinden. De volgende fase richt zich op kwantitatief onderzoek, waarbij verschillende opslaglocaties van boeren worden geanalyseerd. Hierbij zullen parameters zoals temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en andere relevante omgevingsfactoren worden gemeten om een beter inzicht te krijgen in de lokale microklimaten en de ontwerpvereisten van het systeem.

Vóór de bouw van een prototype zal het ontwerp worden geëvalueerd in SolidWorks om de werking te verifiëren en eventuele aanpassingen door te voeren. Vervolgens wordt een fysiek prototype vervaardigd met behulp van een kleiprinter, waarna het via eerste testen verder wordt verfijnd. Tot slot zal het systeem onder reële omstandigheden op een landbouwbedrijf worden getest om de praktische prestaties te beoordelen. Daarnaast wordt verder onderzocht welke technologische componenten zinvol geïntegreerd kunnen worden om de effectiviteit, flexibiliteit en efficiëntie van het systeem te verhogen.

TOI

Technology

Energiezuinige actieve koeling voor gewassen met een hogere koelbehoefte.

Geïntegreerd passief-actief koelsysteem.

Verdampingsbevorderende elementen zoals wateroppervlakken en membranen.

Automatische regeling van temperatuur en luchtvochtigheid.

Geoptimaliseerde luchtstroming voor koeling en vochtbeheer.

Sensoren voor continue monitoring van het bewaarklimaat.

Software

Applicatie voor monitoring, parameterinstellingen en meldingen.

Gewasassistent voor optimale bewaarinstellingen.

Voorspelling van houdbaarheid met waarschuwingen voor bederf.

Marktplaats voor producten die bijna bederven.

Communityforum voor kennisuitwisseling tussen boeren.

Human-Centered

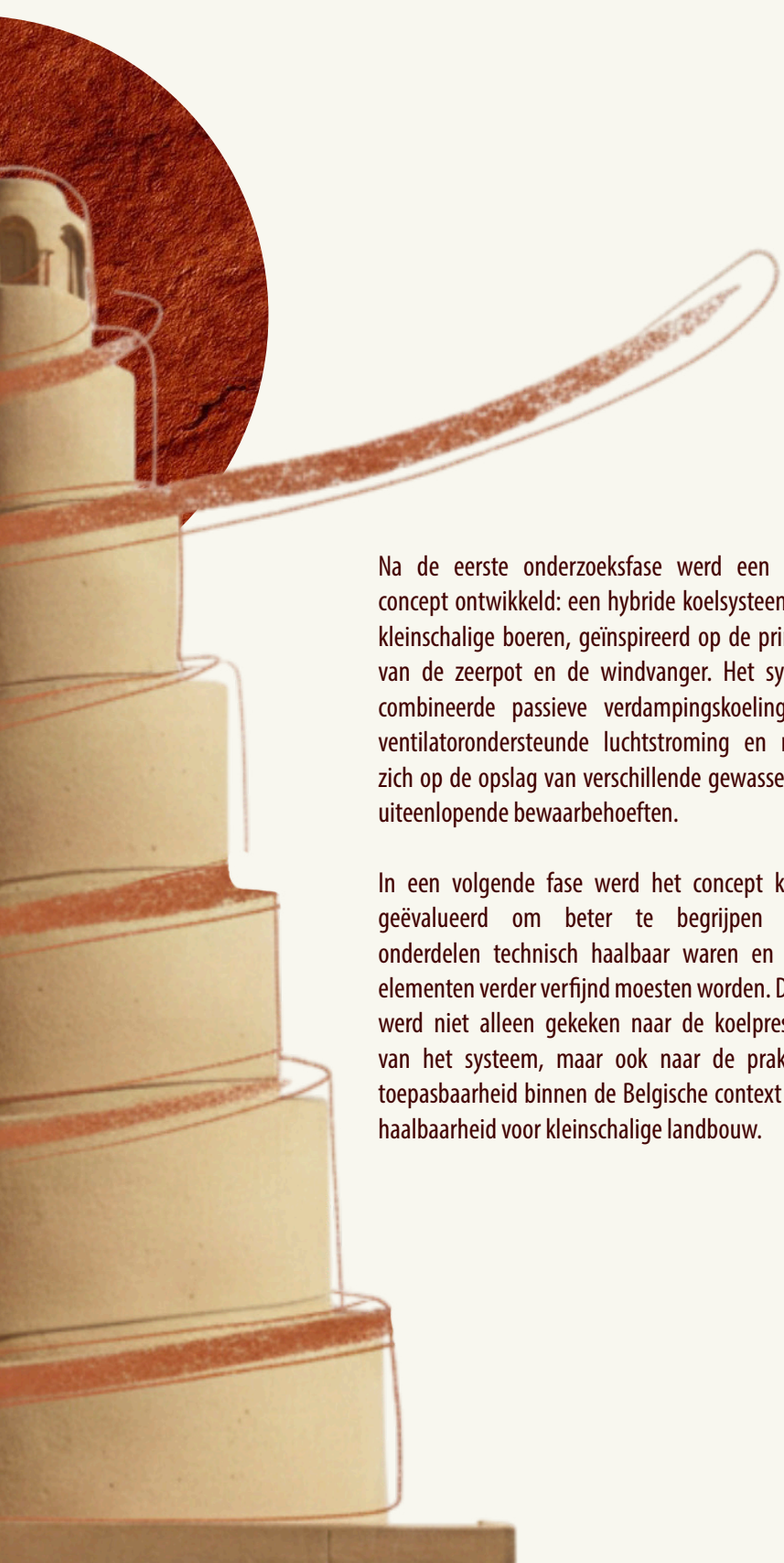
Modulaire compartimenten die vrij kunnen worden gecombineerd en opgesteld.

Flexibele configuratie aangepast aan verschillende landbouwomgevingen.

Ergonomische opslaghoogtes en toegankelijke compartimenten voor het veilig hanteren van zware gewassen.

An abstract illustration on the right side of the page. It features a spiral staircase with a textured, brownish-orange surface, winding upwards. Above the staircase is a large, circular shape with a cracked, orange-brown texture, resembling a planet or a large lens. A thin, curved line sweeps across the middle of the page, passing behind the text.

Systemefase



Na de eerste onderzoeksfase werd een eerste concept ontwikkeld: een hybride koelsysteem voor kleinschalige boeren, geïnspireerd op de principes van de zeerpot en de windvanger. Het systeem combineerde passieve verdampingskoeling met ventilatorondersteunde luchtstroming en richtte zich op de opslag van verschillende gewassen met uiteenlopende bewaarbehoeften.

In een volgende fase werd het concept kritisch geëvalueerd om beter te begrijpen welke onderdelen technisch haalbaar waren en welke elementen verder verfijnd moesten worden. Daarbij werd niet alleen gekeken naar de koelprestaties van het systeem, maar ook naar de praktische toepasbaarheid binnen de Belgische context en de haalbaarheid voor kleinschalige landbouw.

Tijdens deze analyse stonden vier centrale vragen centraal. Eerst werd onderzocht of het windvangerprincipe, dat oorspronkelijk ontwikkeld werd voor warme en droge klimaten, ook effectief kan functioneren binnen Belgische omstandigheden. Daarnaast werd bekeken hoeveel actieve koeling eventueel toegevoegd kan worden zonder dat het systeem te duur, te complex of te energie-intensief wordt.

Verder werd onderzocht of een passieve gecontroleerde atmosfeer haalbaar is voor verschillende gewassen met uiteenlopende bewaarbehoeften. Tot slot werd ook gekeken naar de reële opslagomstandigheden bij Belgische boeren en of deze voldoende geschikt zijn voor verdampingskoeling.

De analyse van deze vragen vormde de basis voor het verder verfijnen van de ontwerprichting en hielp om duidelijker vast te leggen welke ontwerpprincipes centraal moesten blijven binnen het verdere traject.

Kritische analyse van het concept en verfijning van de ontwerprichting

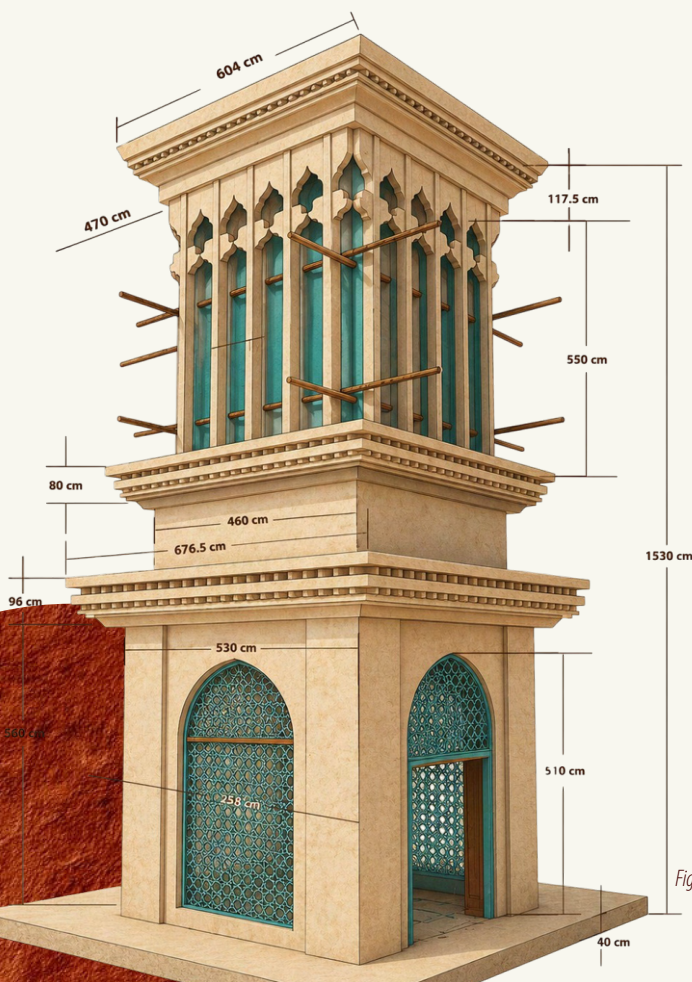
Hoogte van de windvanger

Een eerste aandachtspunt was de schaal van de windvanger. (Figuur 24 Traditionele Perzische windvangers werken dankzij hun grote hoogte, waardoor een natuurlijk drukverschil ontstaat dat lucht door gebouwen trekt.

Een rechtstreekse koppeling met de buitenlucht via gevel of dak bleek voor dit systeem niet geschikt. De Belgische buitenlucht is vaak vochtig, terwijl verdampingskoeling juist droge lucht nodig heeft. Daardoor zou de koelprestatie sterk dalen.

Daarnaast zouden zulke ingrepen bestaande gebouwen aanpassen en de kostprijs verhogen, wat niet past bij kleinschalige boeren.

Daarom werd het windvangerprincipe niet letterlijk overgenomen, maar vertaald naar een compact luchtgeleidend element met een eenvoudige ventilator. Die ventilator werkt niet als actief koelsysteem, maar ondersteunt de passieve verdampingskoeling door lucht langs de poreuze kleiwanden te sturen.



Figuur 24: Afmetingen windtoren

Actieve koeling als aanvullende strategie

Een tweede belangrijk discussiepunt was de mogelijke toevoeging van actieve koeling. Sommige gewassen vereisen lagere temperaturen dan passieve verdamping alleen kan bereiken.

Verschillende technologieën werden onderzocht:

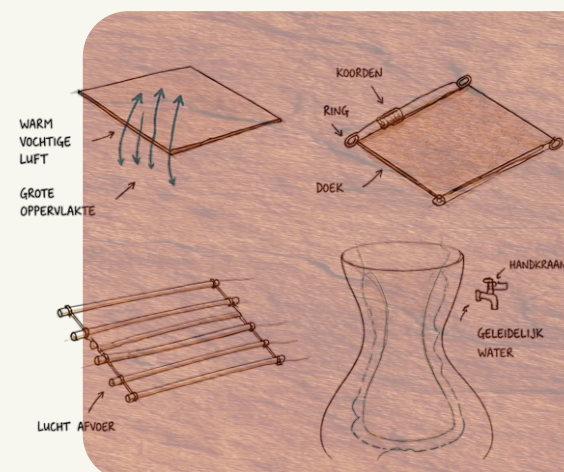
- Peltierkoeling
- vacuümkoeling
- koude spoelen met compressor

Elke technologie bracht echter hetzelfde probleem naar voren: betere koelprestaties gingen onmiddellijk gepaard met een hoger energieverbruik, meer technische complexiteit en hogere aankoopkosten.

Peltiermodules functioneren zonder koelmiddelen en werken stil, maar hebben een laag rendement. Vacuümkoeling kan producten zeer snel afkoelen, maar vereist een luchtdichte installatie en complexe pompsystemen. Een klassieke koude spoel bleek energetisch efficiënter, maar introduceert opnieuw compressoren en koelcircuits die het systeem zwaarder en duurder maken.

Tijdens de analyse werd duidelijk dat een volledig actief koelsysteem haaks staat op de oorspronkelijke doelstelling van de thesis: een elektriciteitsefficiënte en betaalbare oplossing ontwikkelen voor kleinschalige landbouw.

Daarom werd beslist om geen actieve koeling per compartiment toe te voegen. In plaats daarvan wordt de passieve werking van het systeem maximaal versterkt via gecontroleerde luchtstroming langs natte kleiwanden.



Evaluatie van het Janny MT-systeem

Om de houdbaarheid van producten verder te verlengen werd onderzocht hoe een gecontroleerde atmosfeer geïntegreerd kon worden zonder complexe industriële installaties.

Het Janny MT-systeem werd onderzocht als mogelijke oplossing. Dit systeem gebruikt een passief membraan dat zuurstof en CO₂ reguleert zonder elektriciteit.

Hoewel het principe interessant bleek, kwamen tijdens de analyse verschillende beperkingen naar voren.

Ten eerste werkt het systeem enkel correct wanneer producten vooraf voldoende gekoeld zijn. Zonder verkoeling daalt het zuurstofniveau te snel, waardoor anaerobe gisting ontstaat en producten beschadigd raken.

Daarnaast vereist elk gewas een specifieke membraanconfiguratie. Het systeem is daardoor niet universeel inzetbaar voor gemengde opslag van verschillende gewassen.

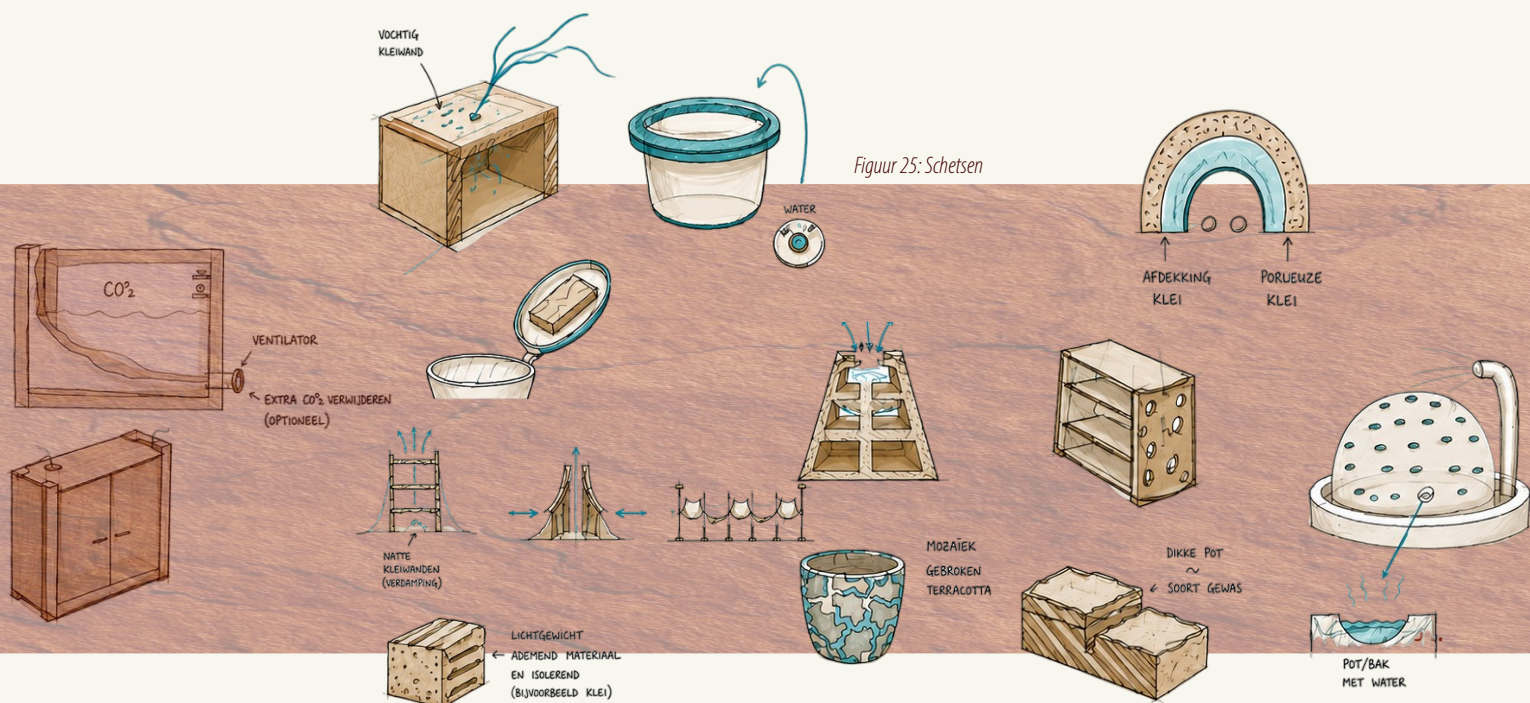
Ook praktisch bleek verdere samenwerking moeilijk. Er werd contact opgenomen met Janny MT om technische informatie en mogelijke integratie te bespreken, maar hierop werd geen antwoord ontvangen. Daarom werd beslist om deze piste voorlopig niet verder uit te werken

Verkenning van alternatieve atmosferische strategieën

Na de beperkingen van het Janny MT-systeem ontstond de vraag of de atmosfeer ook op andere passieve manieren beïnvloed kon worden.

Een van de ideeën die uit de analyse voortkwam, was het gebruik van biologische processen die zuurstof opnemen en CO₂ produceren (Figuur 25). Theoretisch zou een afzonderlijk biologisch compartiment een deel van het effect van gecontroleerde atmosfeer kunnen nabootsen zonder actieve technologie.

Dit idee bevindt zich nog in een verkennende fase en vereist bijkomende microbiologische expertise. Toch toont deze richting opnieuw aan dat het project zoekt naar eenvoudige natuurlijke processen in plaats van complexe technische installaties.



Droge lucht als systeemvoorwaarde

Tijdens de analyse werd duidelijk dat verdampingskoeling volledig afhankelijk is van droge lucht. Zonder voldoende droogte stopt de verdamping en verdwijnt het koelend effect.

Daarom werd onderzocht of de opslagomstandigheden van Belgische boeren daadwerkelijk geschikt zijn voor dit systeem.

Een enquête werd verspreid via verschillende landbouworganisaties en platformen. Het doel was om inzicht te krijgen in:

- temperatuur,
- relatieve luchtvochtigheid,
- ventilatie,
- en het type opslagruimte.

Opvallend was dat bijna geen enkele organisatie beschikte over echte meetgegevens van opslagomgevingen. Meestal waren enkel de theoretisch optimale opslagcondities van gewassen bekend, maar niet de werkelijke omstandigheden in schuren en kelders.

Ook tijdens gesprekken op landbouwbeurzen bleek dat veel boeren hun opslagomgeving nooit meten.

Bij een eerder geïnterviewde boer werd in de kelder een relatieve luchtvochtigheid van 35% gemeten bij 15°C. Deze lage waarde bleek gunstig voor verdampingskoeling. Een andere boer mat in januari 59% relatieve luchtvochtigheid in een schuur.

Deze resultaten tonen aan dat opslagomstandigheden sterk verschillen afhankelijk van het type ruimte. Vooral goed geïsoleerde kelders lijken potentieel geschikt voor het systeem.

Een uitgebreider sensoronderzoek over meerdere seizoenen zou noodzakelijk zijn om definitieve conclusies te trekken. Dit valt momenteel buiten de scope van het project, maar vormt een belangrijke aanbeveling voor verder onderzoek.

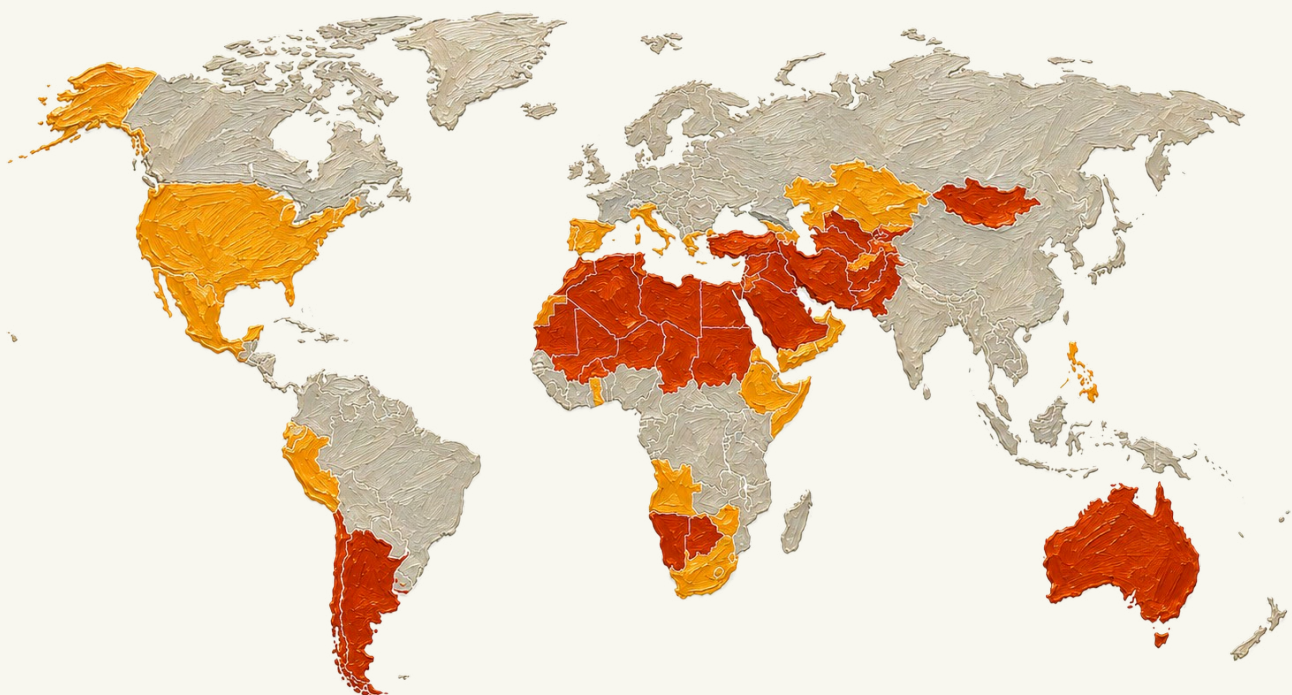
Internationale toepasbaarheid van het systeem

Hoewel de Belgische context uitdagend blijft door de relatief hoge luchtvochtigheid, blijkt het systeem internationaal veel potentieel te hebben.

Droge klimaten beslaan een groot deel van het wereldoppervlak. In regio's zoals Noord-Afrika, het Midden-Oosten en delen van Centraal-Azië zijn de omstandigheden ideaal voor verdampingskoeling.

Daarnaast wijzen Europese renovatie- en klimaatontwikkelingen erop dat opslaggebouwen steeds beter geïsoleerd worden. Naarmate gebouwen luchtdichter worden, vermindert de invloed van vochtige buitenlucht en ontstaan stabielere binnenomgevingen die gunstiger zijn voor het systeem.

Ook klimaatonderzoek toont in delen van Europa een dalende trend in relatieve luchtvochtigheid, wat het potentieel van verdampingskoeling op langere termijn verder kan versterken. (Figuur 26)



BRAINSTORMING:

Low-tech

Het systeem moet eenvoudig, begrijpelijk en onderhoudsvriendelijk blijven. Complexiteit wordt enkel toegevoegd wanneer dit een duidelijke functionele meerwaarde biedt

Tradition

De zeerpot, windvanger en qanat worden niet letterlijk gekopieerd, maar vertaald naar een hedendaags opslagsysteem aangepast aan de schaal van kleinschalige landbouw.

Elektriciteitsefficiënt

Het elektriciteitsverbruik wordt tot een minimum beperkt. De ventilator vormt de enige permanente energieverbruiker en ondersteunt uitsluitend de passieve koeling.

Lage investeringskost

Het systeem moet financieel haalbaar blijven voor kleine boeren. Daarom wordt gewerkt met eenvoudige materialen zoals klei, isolatiemateriaal en beperkte mechanische componenten.



Figuur 27: Brainstorming

Herformulering van de ontwerpprincipes

De kritische analyse van het eerste concept bracht verschillende belangrijke inzichten naar voren. Ze maakte duidelijk dat extra technologie weliswaar nieuwe functies toevoegde, maar tegelijk ook zorgde voor meer complexiteit, hogere kosten en een groter energieverbruik.

Daarom werd het concept opnieuw teruggebracht naar zijn essentie. Uit de analyse bleek dat de meest efficiënte oplossingen nog steeds gebaseerd zijn op eenvoudige, natuurlijke principes: poreuze klei, waterverdamping, gecontroleerde luchtstroming en beperkte mechanische ondersteuning.

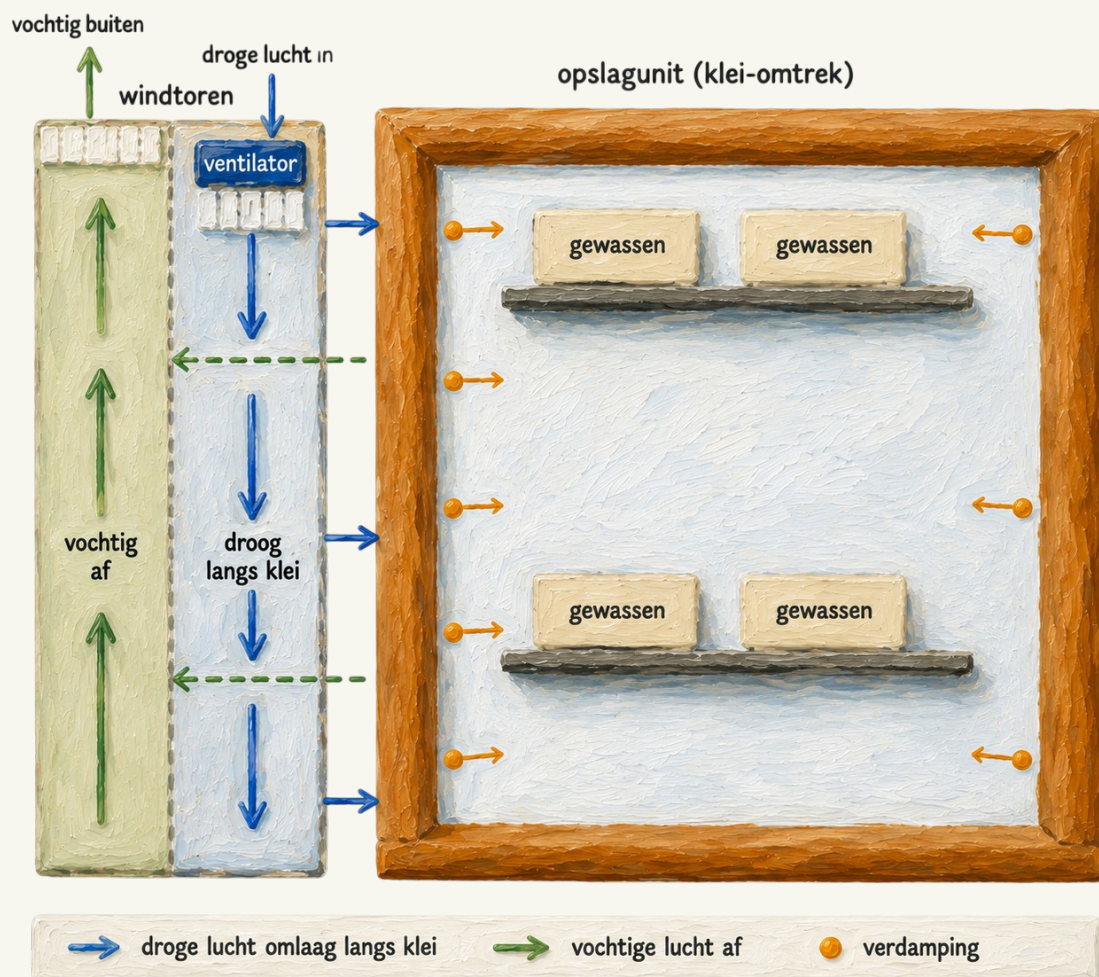
Op basis van deze inzichten werden de oorspronkelijke ontwerpprincipes herwerkt en aangescherpt. Deze nieuwe ontwerpprincipes vormden vervolgens de basis voor een nieuwe brainstormfase, waarbij ze als richtlijn werden gebruikt om nieuwe concepten en oplossingen te ontwikkelen. Vanaf dit punt dienden ze als toetssteen voor elke verdere ontwerpbeslissing.

Schema

Samen vormen deze principes de basis voor het verdere ontwerptraject: de ontwikkeling van een systeem dat voor verschillende gewassen een zo optimaal mogelijke bewaaromgeving creëert, met een minimaal energieverbruik, een beperkte technologische complexiteit en een maximale toegankelijkheid voor kleinschalige landbouwers.

In figuur 28 worden deze principes schematisch samengebracht. In de daaropvolgende fase worden ze vertaald naar eenvoudige functionele prototypes om de technische haalbaarheid van het concept te onderzoeken en te verifiëren.

De focus ligt hierbij volledig op de werking van het systeem, de luchtstroming en de koelprestaties. De vormgeving speelt in deze fase een ondergeschikte rol en wordt pas verder uitgewerkt nadat de technische werking van het systeem voldoende gevalideerd is.



Figuur 28:Schema

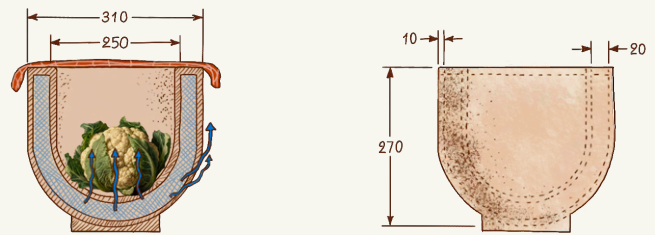
Prototyping



Test 1 : Werkt een traditionele zeerpot in België?

De eerste test onderzocht of het principe van de traditionele zeerpot, ontwikkeld voor warme en droge klimaten, ook bruikbaar is in een Belgische omgeving.

Hiervoor werd een klassieke zeerpot opgebouwd (Figuur 30): een kleine kleipot in een grotere pot, met vochtig zand tussen beide potten en een vochtige doek bovenaan. Binnenin werd een sensor geplaatst om temperatuur en luchtvochtigheid continu op te meten.



Figuur 29: Afmetingen zeerpot

De beginatmosfeer van de kamer bedroeg 20,1°C bij 42% relatieve luchtvochtigheid. Onder deze omstandigheden lag de theoretische wetbulbtemperatuur op 12,7°C.

Na 3 uur en 40 minuten werd in de pot een temperatuur van 14,1°C gemeten bij 99% relatieve luchtvochtigheid. Na 17 uur bleef de temperatuur nog steeds rond 15,2°C hangen, hoewel het grootste deel van het water ondertussen al verdampt was. Onder de pot werd ook een duidelijke plas water waargenomen.



Figuur 30: Zeerpot



Verdampingskoeling werkt ook binnen een Belgische opslagomgeving wanneer de relatieve luchtvochtigheid in de ruimte voldoende laag blijft.



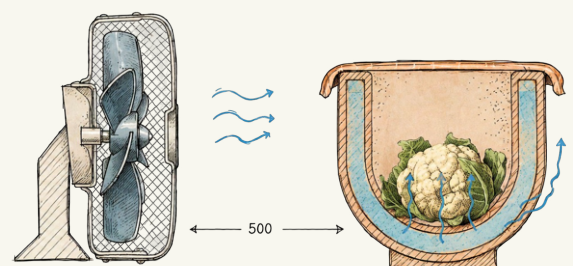
De temperatuur kwam dicht in de buurt van de theoretische wetbulbtemperatuur. Het systeem bleef langdurig koel, zelfs nadat veel water verdampt was.



Daarnaast werd duidelijk dat een toekomstig systeem een opvangreservoir nodig heeft om overtollig water op te vangen en eventueel opnieuw te gebruiken.

Test 2 : Ventilatorondersteuning

Na de eerste test werd onderzocht of een ventilator de verdampingskoeling kon verbeteren (Figuur 31). Uit literatuur over verdampingskoeling blijkt dat luchtstroming langs het oppervlak een grote invloed heeft op de verdamping. Wanneer vochtige lucht rond het oppervlak blijft hangen, vertraagt de verdamping. Door droge lucht langs het oppervlak te sturen, blijft het koelproces actief (González & Franco Salas, 2021). Daarom werd een ventilator van 45 W op ongeveer 500 mm afstand van de zeerpot geplaatst.



Figuur 31: Zeerpot en ventilatie

De beginatmosfeer bedroeg 20,5°C bij 45% relatieve luchtvochtigheid, met een theoretische wetbulbtemperatuur van 13,4°C.

Na exact één uur werd 13,4°C gemeten bij 99% relatieve luchtvochtigheid. Met ventilatorondersteuning werd de wetbulbtemperatuur dus bijna volledig



Figuur 31: Zeerpot met ventilator

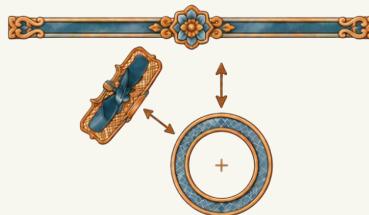
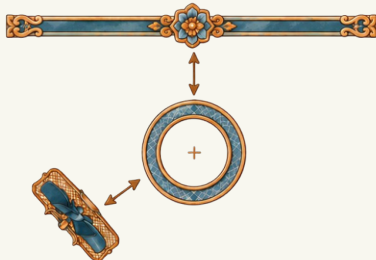
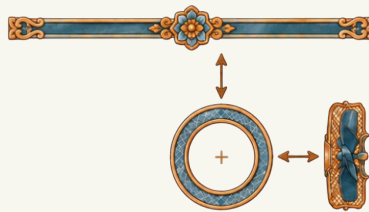
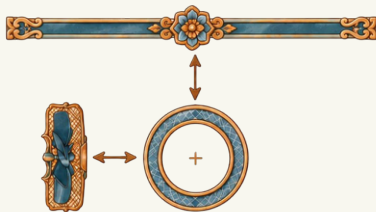


T: 20,5°C & RH: 45%

Tw: 13,4°C

T: 13,4°C & RH: 99%

Test: Posities ventilator



De ventilator mag niet te dicht op het oppervlak gericht worden.

Vochtige lucht moet goed kunnen ontsnappen.

Daarna werd getest hoe de positie van de ventilator de prestaties beïnvloedde. In één opstelling blies de ventilator richting een muur achter de pot. Hierbij verslechterde de koeling merkbaar.

Later werd dit verklaard door een HVAC-expert. De vochtige lucht kon niet goed ontsnappen en bleef achter de pot hangen. Daardoor werd de vochtige lucht onvoldoende vervangen door droge lucht, waardoor de verdamping vertraagde

Een luchtvochtigheid van 99% is te hoog voor gewassen; idealiter blijft deze tussen 85% en 95%.

BRAINSTORMING:

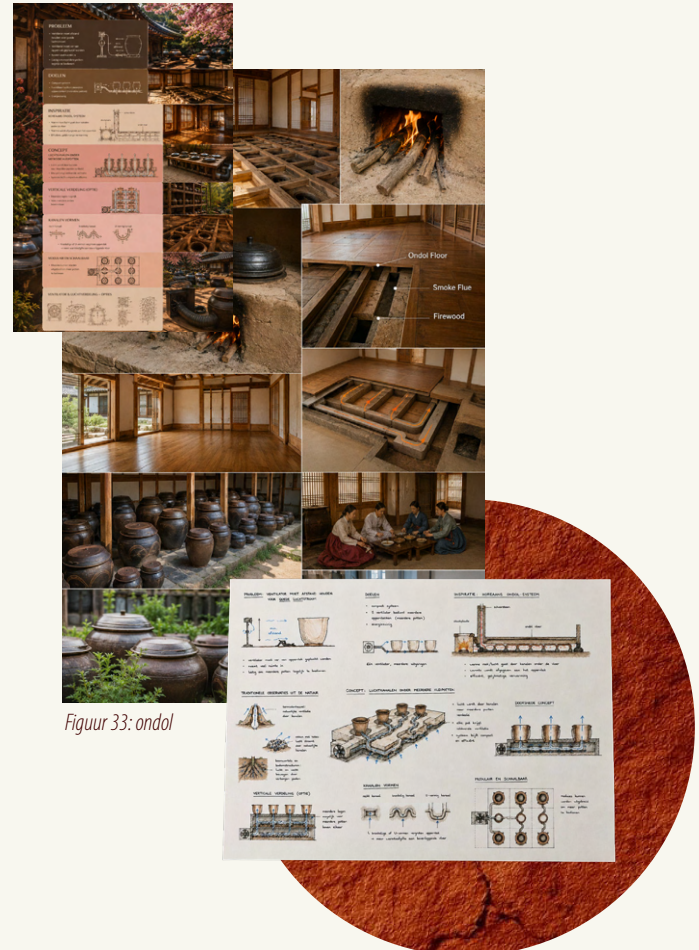
De vereiste afstand tussen ventilator en oppervlak zorgde meteen voor een nieuw probleem. Het systeem moest compact blijven en liefst meerdere aarden potten tegelijk bedienen met één ventilator om elektriciteit te besparen.

Daarom werd opnieuw gekeken naar traditionele systemen. Inspiratie werd gevonden in het Koreaanse ondol-systeem, een traditioneel vloerverwarmingssysteem waarbij warme lucht door een netwerk van kanalen onder de vloer stroomt (Kang, 2021; Asia Society, n.d.).

Het idee ontstond om een soort luchtkanalen onder meerdere kleipotten te maken zodat één ventilator verschillende oppervlakken tegelijk kon bedienen.

Dit concept werd besproken met een kleiexpert, maar bleek uiteindelijk niet efficiënt. Om lucht door al die smalle doorgangen te sturen zou een veel krachtigere ventilator nodig zijn, wat opnieuw zou leiden tot een hoger energieverbruik.

Hierdoor werd beslist om deze richting niet verder uit te werken.



Figuur 33: ondol

Van horizontale naar verticale luchtstroming

Na deze mislukte piste werd opnieuw teruggekeerd naar de oorspronkelijke ontwerpprincipes van de windvanger.

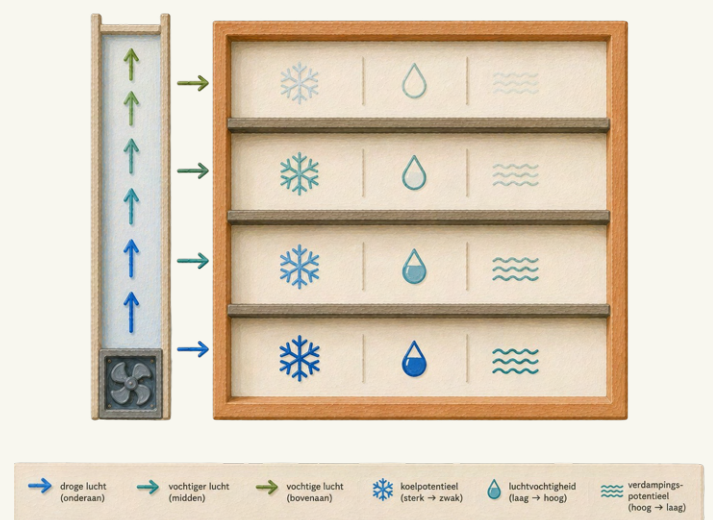
In plaats van lucht horizontaal onder de potten te sturen, werd onderzocht wat er zou gebeuren wanneer droge lucht van onder naar boven langs de kleiwanden zou bewegen.

De ventilator werd onderaan geplaatst zodat lucht verticaal omhoog stroomde langs de natte kleiwanden. De vochtige lucht kon vervolgens bovenaan ontsnappen.

Door deze opstelling konden meerdere kleiwanden compact naast elkaar geplaatst worden terwijl de luchtstroom parallel langs het oppervlak bleef bewegen.

Dit betekent echter ook dat de lucht onderweg steeds vochtiger wordt. Zoals zichtbaar in figuur 34, bevat de lucht onderaan de toren nog weinig vocht, waardoor de eerste unit het sterkste koelpotentieel heeft. Naarmate de lucht verder omhoog beweegt langs meerdere natte oppervlakken, neemt de luchtvochtigheid toe en vermindert het verdampingspotentiaal. Hierdoor zal de bovenste unit minder efficiënt koelen dan de onderste unit.

De onderste unit beschikt dus over de droogste lucht en zal theoretisch de beste koelprestaties leveren, terwijl de bovenste unit werkt met reeds vochtiger geworden lucht en daardoor een lagere koelcapaciteit heeft.



Figuur 34: schema vochtiging

Test 3: Verticale windvangeropstelling

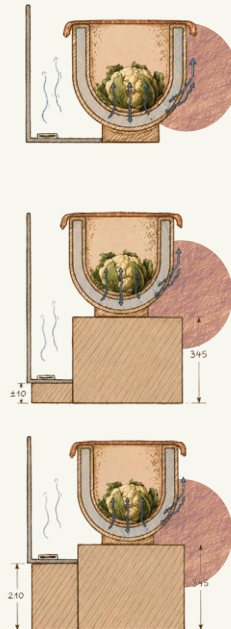
Voor deze test werd gewerkt met Arduino-sensoren die elke vijf minuten metingen uitvoerden. Hierdoor konden temperatuur en luchtvochtigheid nauwkeuriger opgevolgd worden.

Er werden twee sensoren geplaatst:

- één binnenin de zeerpot,
- één bovenaan de toren om de uitlaatlucht te meten.

Verschuillende posities van de zeerpot werden getest.

De slechtste resultaten ontstonden wanneer de luchtstroom onmiddellijk tegen de onderzijde van de pot botste. Wanneer de pot hoger werd geplaatst zodat de lucht meer contact maakte met het volledige oppervlak, verbeterde de koeling aanzienlijk.



Figuur 35: Afmetingen zeerpot

De beginatmosfeer bedroeg 21°C bij 53% relatieve luchtvochtigheid. De theoretische wetbulbtemperatuur lag rond 15°C.

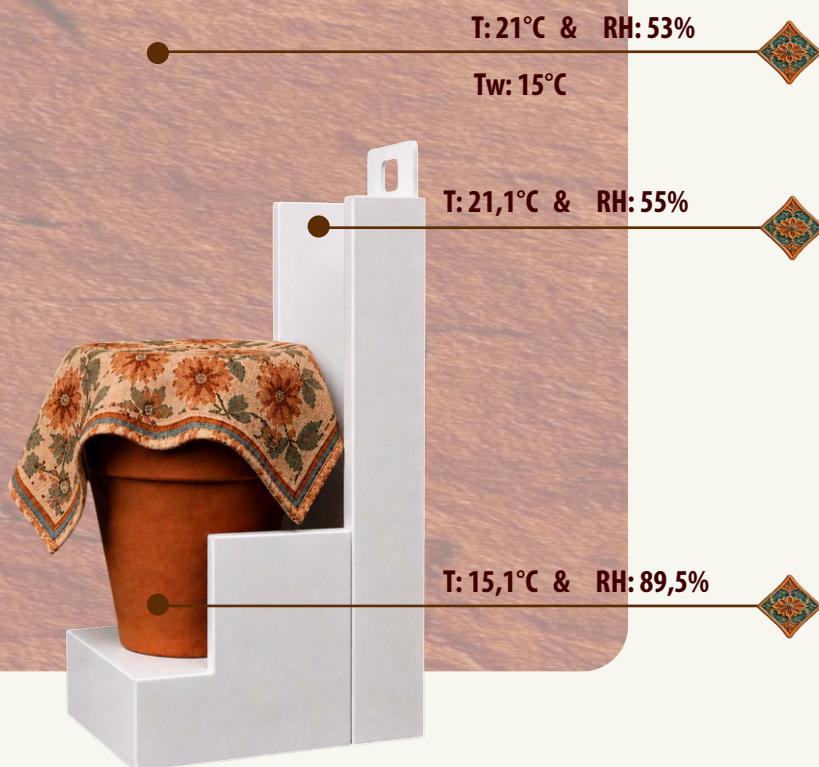
Na één uur werd effectief 15°C bereikt binnenin de pot, met een luchtvochtigheid van 89,5%. Dit bevindt zich binnen de gewenste zone voor gewasopslag.

De lucht bovenaan de toren bleek slechts 2% vochtiger dan de inkomende lucht. Dit resultaat moet wel kritisch bekeken worden omdat de opstelling nog niet volledig gesloten was en vochtige lucht langs verschillende zijden kon ontsnappen.

3x 10W



Figuur 36: Prototype parallel ventileren



De verticale configuratie maakt het systeem compacter.



Vochtige uitlaatlucht moet gecontroleerd afgevoerd worden.



Massieve klei bleek echter veel te zwaar voor een schaalbaar systeem.

BRAINSTORMING:

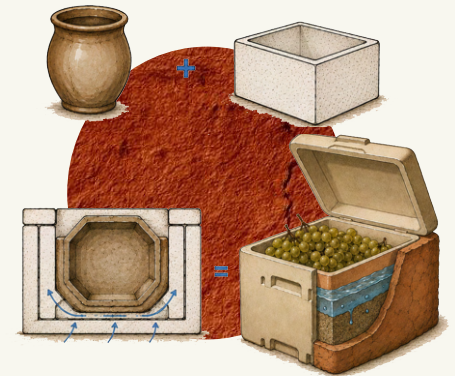
Van massieve klei naar een hybride wand

Het gewicht van massieve klei maakte duidelijk dat een volledig systeem uit klei moeilijk schaalbaar zou zijn. Tijdens de analysefase werd daarom teruggekeken naar eerder onderzoek rond de traditionele gangina-opslagmethode en piepschuimdozen voor druivenbewaring. In die analyse bleek dat piepschuim zeer goede eigenschappen heeft voor voedselopslag: het houdt temperatuur stabiel, beperkt gewichtsverlies van gewassen en werkt sterk isolerend terwijl het tegelijk licht en goedkoop blijft.

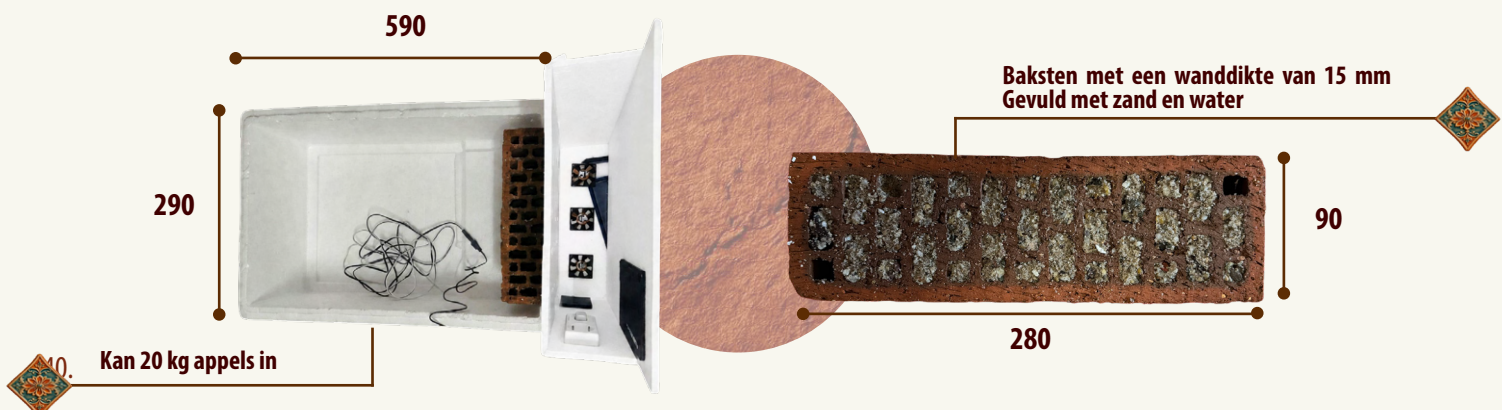
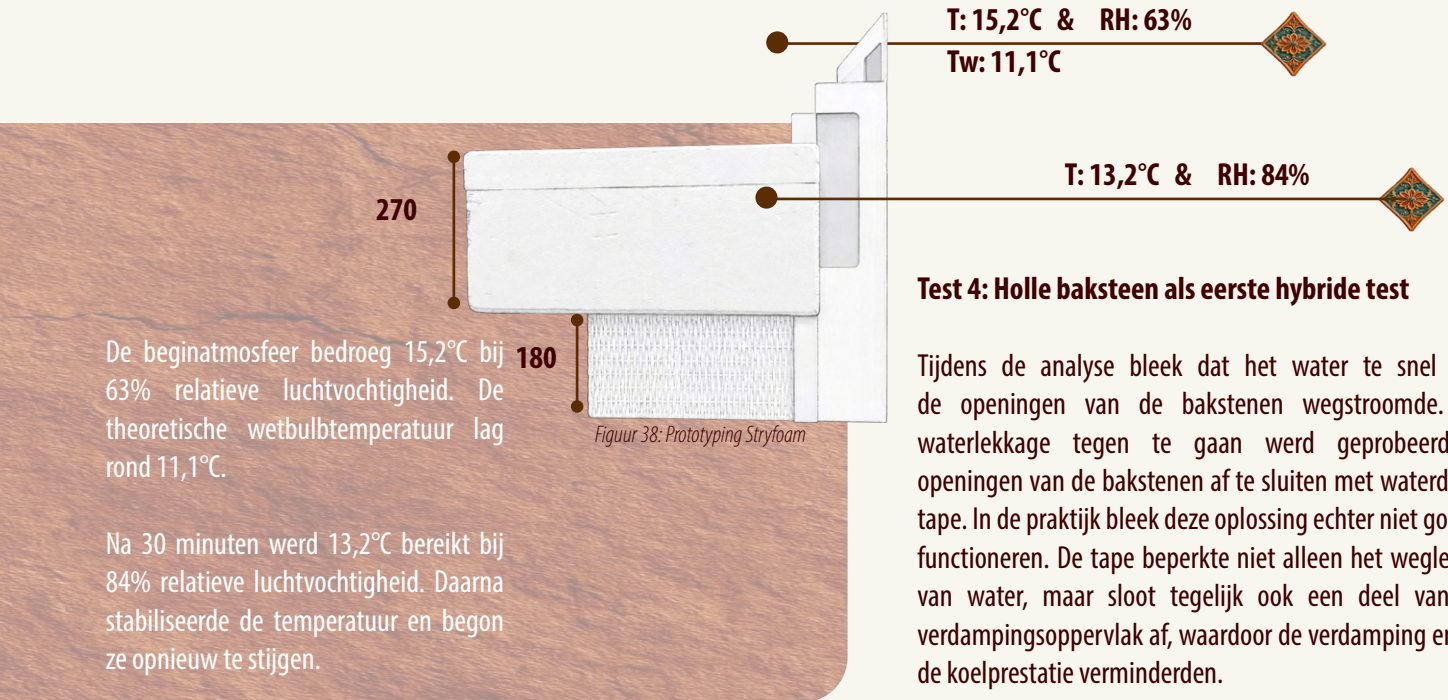
Die bevinding vormde de aanleiding om piepschuim opnieuw te integreren binnen het ontwerp. In plaats van een systeem volledig uit klei op te bouwen, ontstond het idee om beide materialen te combineren

De klei zou dus functioneren als het koelende element, terwijl het piepschuim warmte van buitenaf tegenhoudt en de gekoelde lucht langer in het systeem bewaart. Hierdoor evolueerde het concept naar een hybride combinatie van een zeerpot en een geïsoleerde koelbox.

Via snelle schetsen en functionele testen werd onderzocht hoe beide materialen het best gecombineerd konden worden. Uiteindelijk leidde dit tot een systeem waarbij een verdampende kleiwand geïntegreerd wordt in een geïsoleerde torenstructuur.



Figuur 37: Gangina met styrofoam



Test 5: 3D-geprinte kleiwand

Om meer controle te krijgen over de vorm, waterverdeling en geometrie van de kleiwand werd onderzocht of een 3D-kleiprinter gebruikt kon worden. De klei werd voorbereid voor het printproces, enkele dagen gedroogd en daarna gebakken in de oven.

De wand kreeg een geribbeld profiel zodat het verdampingsoppervlak groter zou worden. De onderzijde werd gesloten ontworpen zodat water beter kon worden vastgehouden.



T: 20,7°C & RH: 53%

Tw: 14,7°C

De beginatmosfeer bedroeg 20,7°C bij 53% relatieve luchtvochtigheid.

De theoretische doeltemperatuur bedroeg ongeveer 14,7°C. Toch daalde de temperatuur niet onder 17°C en bleef de luchtvochtigheid hangen rond

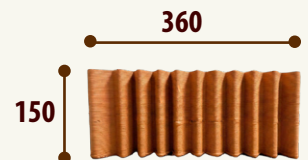


T: 17°C & RH: 70%



De wand presteerde slechter dan verwacht door de ribgeometrie. Diepe, dicht op elkaar staande ribben zorgen dat lucht niet goed over het oppervlak stroomt, wat leidt tot "cavity flow" (Han et al., 1991): lucht beweegt enkel over de ribtoppen, terwijl ze in de diepere zones stagneert en verzadigt met vocht, waardoor verdamping afneemt.

Haghighi & Or (2013) tonen aan dat verdampingskoeling afhangt van constante vernieuwing van de luchtlaag langs het oppervlak. De combinatie van de agressieve ribgeometrie en lage luchtsnelheid verklaart de tegenvallende koelprestatie.



Figuur 39: klei voorbereiden



Klei voorbereiden voor de printer.

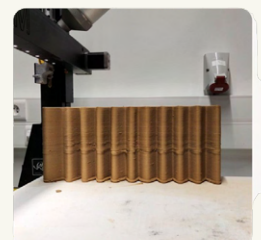


Geïnspireerd van olifanten huid

Olifanten hebben een gerimpelde huid die een groter oppervlak creëert waardoor meer water vastgehouden en verdampt kan worden.



Voor bakken

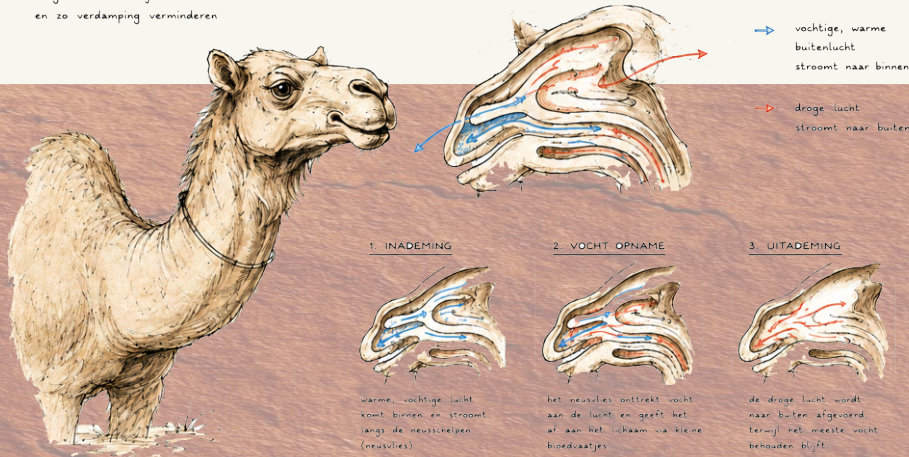


Deze vorm om meer oppervlakte te creëren

De sinusvormige kleiwand had een totaal geometrisch oppervlak van 0,19 m² in plaats van 0,054 m² (0,15 x 0,36)

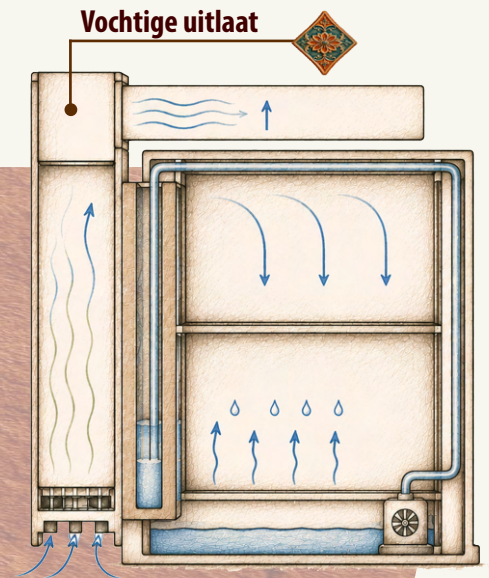
- kameel kan vochtige lucht hergebruiken via zijn neusvlies en zo verdamping verminderen

HOE HET NEUSVLIES VAN EEN KAMEEL WERKT



Figuur 39: Kameel geïnspireerd

RESULTAAT: kameel verliest zeer weinig vocht tijdens het ademen en kan zo langdurig zonder water.



Kameel geïnspireerd

Tijdens de verschillende testen ontstond ook een nieuwe ontwerp vraag. Hoewel vochtige lucht de verdamping lokaal vermindert, blijft vocht tegelijk een waardevolle bron binnen het systeem. Daarom werd onderzocht of de uitgaande vochtige lucht in de toekomst opnieuw benut zou kunnen worden in plaats van volledig verloren te laten gaan.

Hiervoor werd inspiratie gezocht in de natuur, en meer specifiek bij de kameel. Kamelen verliezen opvallend weinig vocht tijdens het ademen dankzij hun speciale neusslijmvliezen.

Hiervoor werd inspiratie gezocht in de natuur, en meer specifiek bij de kameel. Kamelen verliezen opvallend weinig vocht tijdens het ademen dankzij hun speciale neusslijmvliezen. In hun neusholte bevinden zich sterk geplooide slijmvliesstructuren die werken als een warmte- en vochtwisselaar. Wanneer de kameel uitademt, stroomt warme vochtige lucht langs deze koelere slijmvliezen waardoor een deel van het vocht opnieuw condenseert en wordt teruggewonnen. Bij de volgende inademing wordt dat vocht opnieuw opgenomen door de droge lucht. Hierdoor kan de kameel een groot deel van zijn vocht recupereren in extreem droge omgevingen.

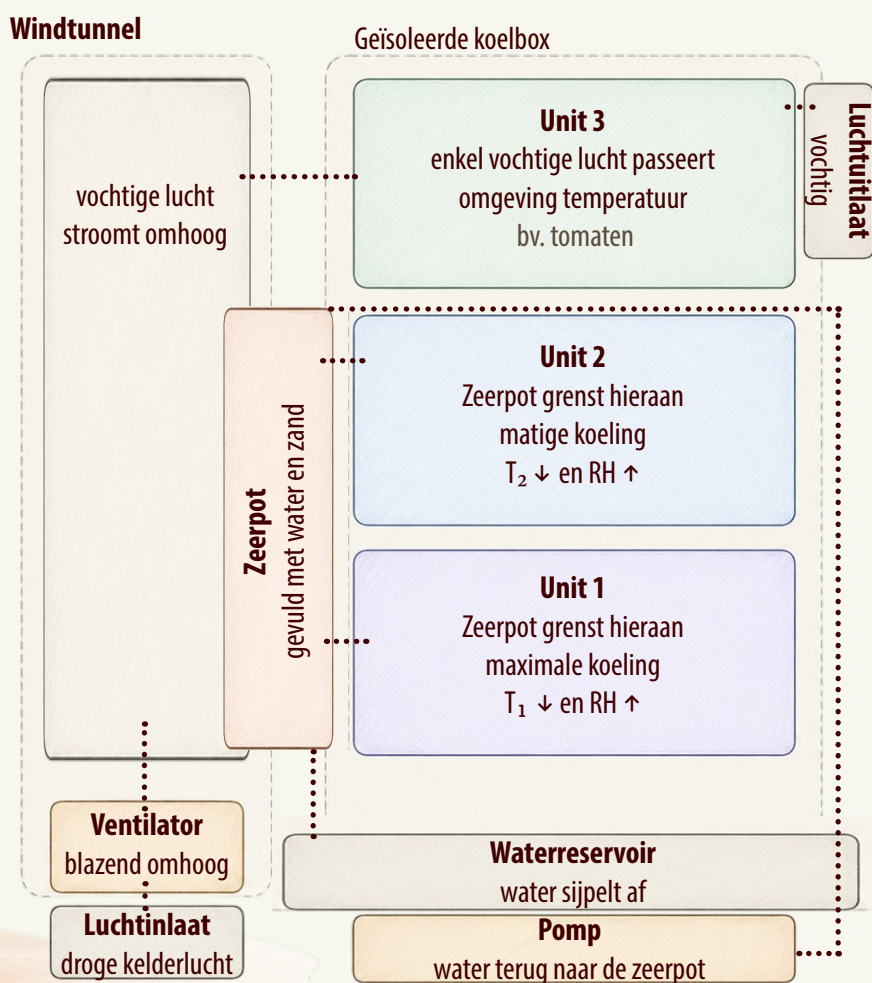
Productarchitectuur

De lucht komt onderaan het systeem binnen via de luchtinlaat en wordt door de ventilator omhoog gestuurd door de windtunnel. Langs deze windtunnel bevindt zich de zeerpotwand van gebakken klei. Doordat water aan het oppervlak verdampt, wordt warmte onttrokken aan de lucht en aan de aangrenzende koelunits, waardoor de temperatuur binnenin daalt.

De zeerpotwand grenst enkel aan unit 1 en unit 2. Unit 1 onderaan krijgt de droogste lucht, waardoor de verdamping hier het sterkst is en de meeste koeling ontstaat. Deze unit is bedoeld voor appels, die de laagste bewaar temperatuur nodig hebben. Unit 2 in het midden krijgt lucht die al gedeeltelijk verzadigd is, maar nog voldoende droog blijft om verdere verdamping mogelijk te maken. De koeling is hier minder sterk, terwijl de luchtvochtigheid hoger ligt, wat deze unit geschikt maakt voor paprika's.

Unit 3 bovenaan grenst niet aan de zeerpotwand. De lucht die hier passeert is ondertussen bijna volledig verzadigd, waardoor er nauwelijks nog extra koeling ontstaat. De temperatuur blijft er dichterbij de omgevingstemperatuur, terwijl de luchtvochtigheid het hoogst is. Dit maakt deze unit geschikt voor tomaten, die minder nood hebben aan koeling maar wel profiteren van een hoge luchtvochtigheid.

Tijdens de prototypetest werd vastgesteld dat water langs de zeerpotwand naar beneden sijpelde en zich onderaan het systeem verzamelde. Om dit water opnieuw te gebruiken, werd onderaan een waterreservoir geplaatst dat het opving. Een pomp bracht het water vervolgens terug naar boven zodat de zeerpotwand continu bevochtigd bleef. Zo ontstond een gesloten waterkringloop, al was hiervoor wel een extra elektrische pomp nodig.



Figuur 40: Productarchitectuur

Synthese van de prototypefase

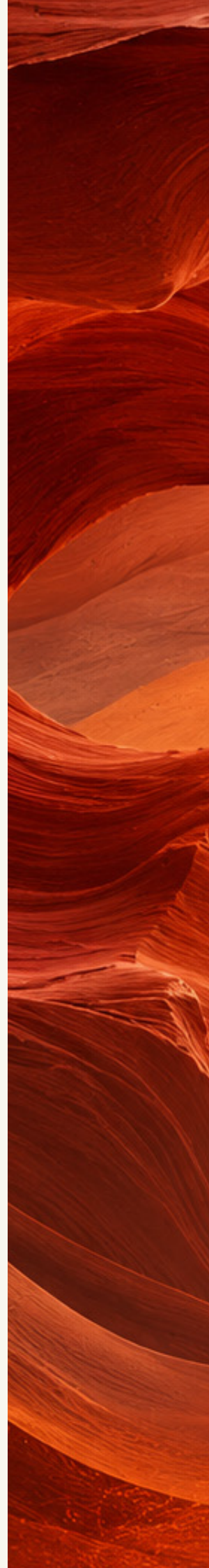
De prototypefase maakte stap voor stap duidelijk welke principes effectief werken en welke onderdelen verder verfijnd moeten worden. De eerste testen bevestigden dat verdampingskoeling via poreuze klei ook binnen een Belgische context functioneert, zolang de relatieve luchtvochtigheid in de opslagruimte voldoende laag blijft. Met ventilatorondersteuning kon de temperatuur bovendien zeer dicht bij de theoretische wetbulbtemperatuur gebracht worden.

Tijdens de verschillende opstellingen werd duidelijk dat niet enkel de hoeveelheid lucht belangrijk is, maar vooral de manier waarop de lucht langs het oppervlak beweegt. Parallele luchtstroming langs de kleiwand werkte beter dan lucht die rechtstreeks op het oppervlak botst. Ook bleek een goede afvoer van vochtige lucht essentieel: wanneer vochtige lucht rond het oppervlak bleef hangen, verminderde de verdamping en daalde de koelprestatie merkbaar.

Daarnaast brachten de prototypes ook praktische beperkingen aan het licht. Massieve klei bleek veel te zwaar voor een schaalbaar systeem. Hierdoor verschoof het onderzoek naar een hybride combinatie van klei en piepschuim, geïnspireerd op eerdere analyses rond gangina-opslag en piepschuimdozen. Deze combinatie lijkt veel potentieel te hebben omdat ze actieve verdampingskoeling combineert met lichte en efficiënte isolatie.

De testen met de 3D-geprinte kleiwand maakten vervolgens duidelijk dat niet alleen het materiaal zelf belangrijk is, maar ook de geometrie van het oppervlak, de porositeit van de klei, de waterverdeling en de luchtstroming. De vorm van de ribbels en de manier waarop lucht zich langs het oppervlak beweegt hebben een directe invloed op de verdamping en dus op de koelprestaties.

Hoewel niet elke test het gewenste resultaat gaf, zorgde elke prototypefase voor nieuwe inzichten die het systeem verder verfijnden. Het proces bevestigde dat het project niet draait rond één afzonderlijk object, maar rond het zorgvuldig afstemmen van materiaal, lucht, water en geometrie binnen één geïntegreerd koelsysteem.





Proof of concept



Traditionele wijsheid, moderne toepassing

Na de prototypefase werd het concept verder verfijnd en technisch onderbouwd. De resultaten uit de eerdere testen vormden hierbij het vertrekpunt. In deze fase lag de focus niet langer enkel op het bewijzen dat verdampingskoeling werkte, maar vooral op de vertaalslag naar een realistisch en bruikbaar systeem voor kleinschalige landbouw.

Tijdens deze fase werd verder onderzocht:

- hoe de prototype-resultaten zich verhouden tot de theorie,
- welke afmetingen praktisch bruikbaar zijn voor boeren,
- welke materialen geschikt zijn,
- hoeveel verdampingsoppervlak nodig is,
- en hoe het systeem structureel opgebouwd kan worden
- de ergonomie van de boer.

User journey met feedback boer



Scan je gewas

Scan je gewas om meer info te krijgen over de optimale bewaarconditie. En de applicatie laat zien waar je best jouw gewas plaatst.



Stap 1

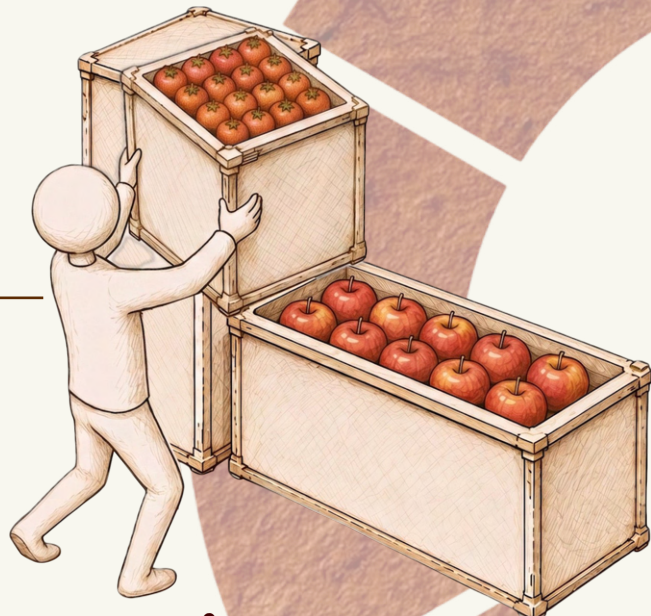


Plaats je gewas

Plaats gewas in de juiste unit.

Feedback boer

- Hoe zwaar wordt de unit wanneer ze volledig gevuld is met klei, water en gewassen?
- Blijft de onderste unit gemakkelijk bereikbaar, of moeten eerst de bovenliggende units



Stap 2



Notificatie

Ontvang een notificatie wanneer je gewas bijna slecht wordt



Stap 3

Stap 6

Markt



Voor overschotten bevat de app ook de Bormarkt, een lokale marktplaats waar producten rechtstreeks verkocht kunnen worden aan buurtbewoners of restaurants.

Feedback boer

- Meestal geef ik overschotten mee aan klanten. Als ik er via de app nog iets aan kan verdienen, is dat mooi meegenomen.
- Van tomaten maak ik vaak passata en andere groenten vries ik in. Het zou handig zijn als de app verwerkingssuggesties geeft om gewassen langer te bewaren en verspilling te voorkomen.

Stap 5

Community



Deel en vraag over bewaren, gewassen en voedselverwerking.

Feedback boer

- Interessant om ervaringen uit te wisselen met andere boeren over gewassen, kruisingen en bewaar technieken.

Stap 4

Natuurlijke bewaarmethodes



De app toont natuurlijke methodes om voedsel langer te bewaren zonder elektriciteit

Feedback boer

- Zeer leerrijk. Wel belangrijk dat de app ook aangeeft of zo'n techniek geschikt is voor jouw regio, want niet elke bewaarmethode werkt overal even goed door verschillen in klimaat en luchtvochtigheid.



Verificatie met experts

Na de prototypefase werd het systeem besproken met een bouwkundige en een HVAC-expert. Beide experts zagen potentieel in het concept en hielpen tegelijk om beter te begrijpen waarom bepaalde prototypes beter presteerden dan andere.

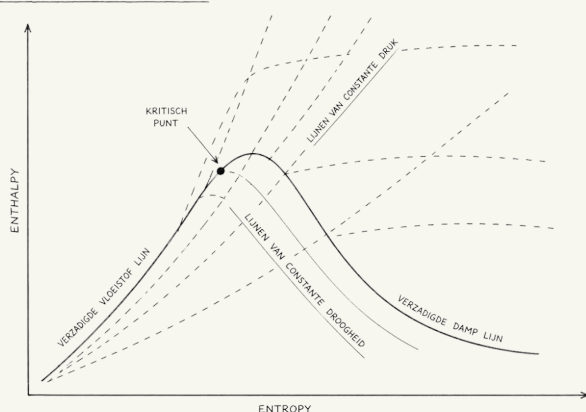
Tijdens deze gesprekken werd ook onderzocht waarom de 3D-geprinte zeerpot minder goed koelde dan theoretisch verwacht. Om het systeem verder te kunnen dimensioneren, stelde de HVAC-expert een rekenmethode voor op basis van het Mollier-diagram (h,x-diagram). Met dit model kan bepaald worden hoeveel warmte uit een opslagunit verwijderd moet worden om de lucht theoretisch af te koelen tot de natteboltemperatuur. Zodra deze warmtelast gekend is, kan vervolgens berekend worden hoeveel actief kleioppervlak nodig is om voldoende verdampingskoeling te leveren.

Voordat deze berekening gemaakt kon worden, moesten eerst de afmetingen van de uiteindelijke opslagunit en de gekozen materialen vastgelegd worden. De grootte van de unit bepaalt namelijk hoeveel warmte via de wanden binnendringt, terwijl de materiaaleigenschappen bepalen hoe goed de koude wordt vastgehouden of juist naar de omgeving verloren gaat. Pas wanneer deze warmtelast gekend is, kan bepaald worden hoeveel koelvermogen de zeerpotwand moet leveren.

Om beter te begrijpen hoeveel koeling theoretisch mogelijk is binnen het systeem, werd gebruikgemaakt van het Mollier-diagram, ook wel het h,x-diagram genoemd. Dit diagram beschrijft het gedrag van vochtige lucht aan de hand van drie grootheden: temperatuur, absolute luchtvochtigheid en enthalpie (de energie-inhoud van de lucht). Elke combinatie van deze waarden komt overeen met een specifiek punt in het diagram.

Voor de berekeningen werden standaard psychrometrische formules gebruikt om de luchtvochtigheid, dampdruk en energie-inhoud van de lucht te bepalen.

MOLLIER, ENTHALPY - ENTROPY DIAGRAM



Verklaring van het meetverschil bij de 3D-geprinte zeerpot

Tijdens de prototypefase werd met de 3D-geprinte zeerpot een temperatuur van 17,1°C gemeten. Om te begrijpen waarom de koeling lager uitviel dan verwacht, werd onderzocht of het oppervlak van de kleiwand theoretisch voldoende groot was en waar het prestatieverlies precies ontstond.

De sinusvormige kleiwand had een totaal geometrisch oppervlak van 0,19 m². Met drie parallel geplaatste PC-ventilatoren van elk 10 W ontstond een luchtsnelheid van ongeveer 1 m/s. Bij een geschatte verdampingsflux van 30 W/m² leverde dit theoretisch volgend koelvermogen op:

$$\text{Koelvermogen} = 0,19 \text{ m}^2 \times 30 \text{ W/m}^2 = 5,7 \text{ W}$$

Daarna werd gekeken hoeveel warmte de piepschuimdoos verloor:

$$5,7 = 1,1 \times 0,87 \times \Delta T$$
$$\Delta T = 5,7 / 0,957 = 5,96^\circ\text{C}$$

Hieruit volgde een theoretische eindtemperatuur van:

$$20,7 - 5,96 = 14,74^\circ\text{C}$$

Met het volledige oppervlak zou de wand dus theoretisch bijna tot de wet-bulb temperatuur van 14,2°C kunnen koelen. Het beschikbare oppervlak bleek dus in principe voldoende.

Tijdens de analyse werd echter duidelijk dat het probleem vooral bij de luchtstroming lag. Door de diepe sinusvormige ribbels kon de lucht de diepere zones tussen de ribbels moeilijk bereiken. De lucht stroomde voornamelijk over de toppen terwijl de lucht in de dalen bijna stil bleef hangen. Hierdoor werd een groot deel van het oppervlak nauwelijks gebruikt voor verdamping. Dit fenomeen staat bekend als cavity flow.

Daardoor daalde het effectief actief verdampend oppervlak van 0,19 m² naar ongeveer 0,0804 m², dus minder dan de helft van het oorspronkelijke oppervlak. Met dat kleinere actieve oppervlak kon de wand nog slechts ongeveer 2,41 W koelvermogen leveren. Dat bleek onvoldoende om het warmteverlies van de doos volledig te compenseren en de theoretische doeltemperatuur te bereiken.

Dit verklaart waarom uiteindelijk 17,1°C werd gemeten in plaats van de theoretische 14,74°C.

Uit deze analyse werd duidelijk dat diepe sinusvormige ribbels minder geschikt zijn als koeloppervlak bij lage luchtsnelheden. De geometrie van de ribbels moet zo ontworpen worden dat de lucht het volledige oppervlak goed kan bereiken zonder stilstaande zones te creëren. Dit vormde de aanleiding voor verder onderzoek naar geoptimaliseerde ribgeometrieën binnen het verdere ontwerptraject.

Bepaling van de afmetingen van de units

Om te berekenen hoeveel kleioppervlak de units nodig hebben voor een efficiënte koeling, moesten eerst de afmetingen van de units bepaald worden. Daarbij werd vertrokken vanuit het praktische gebruik: welke kratten gebruikt de boer, hoeveel moeten er in passen en hoeveel ruimte is nodig om die kratten comfortabel te kunnen hanteren?

Pas nadat deze praktische vragen beantwoord waren, konden de binnen- en buitenmaten bepaald worden en kon het benodigde kleioppervlak berekend worden.

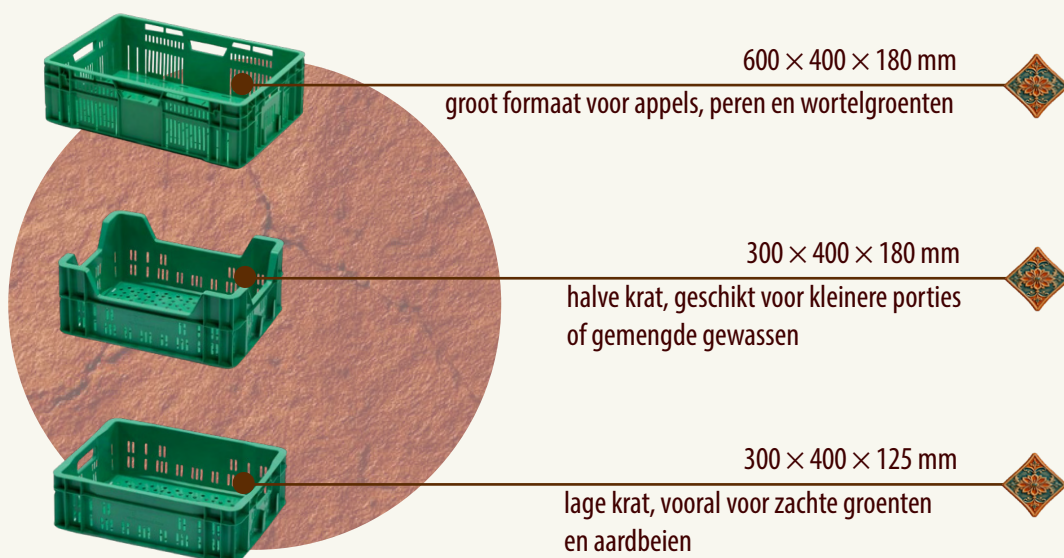
Van stapelbare bakken naar units met deuren

Het oorspronkelijke concept werkte met stapelbare bakken. Tijdens gesprekken met boeren bleek dit echter weinig praktisch in dagelijks gebruik. Gestapelde bakken maken individuele toegang moeilijk en zijn minder geschikt wanneer verschillende gewassen tegelijk opgeslagen worden met andere bewaaromstandigheden.

Daarom werd gekozen voor een systeem met afzonderlijke units en deuren, vergelijkbaar met een klassieke koelkast. Elke unit krijgt zo een eigen compartiment waarin gewassen apart bewaard kunnen worden. Dit sluit beter aan bij de manier waarop kleinschalige boeren verschillende gewassen tegelijk bewaren.

Uitgangspunt: hoeveel kratten moeten er in passen?

Als basis voor het ontwerp werd gewerkt met standaard eurokratten omdat deze al veel gebruikt worden binnen de landbouwsector. Ze zijn stapelbaar, geperforeerd voor luchtcirculatie en beschikbaar in vaste standaardmaten. Voor dit systeem werden drie veelgebruikte kratformaten geselecteerd:



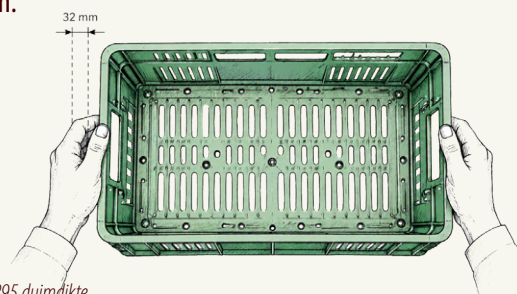
Figuur 42: Afmetingen eurokratten

Het systeem moest voldoende flexibel blijven zodat verschillende kratcombinaties mogelijk zijn. Hierdoor kan de boer kiezen tussen grotere opslagvolumes of kleinere compartimenten voor verschillende gewassen, zonder dat de unit groter of zwaarder wordt.

Ergonomische randvoorwaarden: handbreedte P95

Naast de kratmaten speelt ook de manier waarop de boer de kratten vastneemt een belangrijke rol in de afmetingen van de unit. Bij het plaatsen of verwijderen van een krat houdt de gebruiker de bak vast langs beide zijanten. De grip gebeurt dus vooral met de handen naast de krat, waardoor voldoende ruimte nodig is om comfortabel te kunnen bewegen.

Daarom werd gekeken naar de handdikte van gebruikers. Volgens de DINBelg 2005 antropometrietabel bedraagt de handdikte bij het 95e percentiel (P95) van de Belgische bevolking ongeveer 32 mm. Door te ontwerpen op basis van P95 wordt ervoor gezorgd dat bijna alle gebruikers voldoende ruimte hebben om de kratten comfortabel te hanteren.



Figuur 41: P95 duimdikte

Per zijde werd extra bewegingsruimte voorzien zodat de handen niet tegen de wanden schuren tijdens het plaatsen van de kratten. Hierdoor kwam de benodigde extra ruimte uit op ongeveer 55 mm per zijde. Omdat aan beide zijden ruimte nodig is, moest in totaal 110 mm extra breedte voorzien worden binnenin de unit.

Deuropening

Elke unit heeft een deur aan de voorzijde. De opening moest groot genoeg zijn zodat de krat samen met de handen van de gebruiker comfortabel door de opening kan bewegen.

Daarom werd gekozen om de deuropening bijna even breed te maken als de volledige binnenmaat van de unit. Rond de opening werd enkel een beperkte rand van 15 mm voorzien voor de sponning en de afdichting, waardoor de bruikbare opening maximaal behouden blijft.

Bepaling van de binnenmaten

Op basis van de kratmaten, de extra ruimte voor de handen en de deuropening konden de definitieve binnenmaten van de units bepaald worden. (Figuur 43)

Voor de breedte werd vertrokken vanuit de breedte van de kratten, aangevuld met extra ruimte langs beide zijden zodat de gebruiker de kratten comfortabel kan vastnemen en verplaatsen. Hierdoor kwam de totale binnenbreedte uit op 740 mm voor Unit A en 440 mm voor Unit B.

De standaard eurokrat heeft een diepte van 400 mm. Omdat de krat niet strak tegen de deur of achterwand mag zitten, werd extra speling voorzien aan de voor- en achterzijde. Zo kan de krat gemakkelijk geplaatst worden en kan de deur correct sluiten. Daarom werd de diepte voor beide units vastgelegd op 450 mm.

De gekozen binnenmaten laten verschillende kratcombinaties toe, waardoor het systeem flexibel gebruikt kan worden voor verschillende gewassen en opslagvolumes.

Materiaalkeuze en wandopbouw

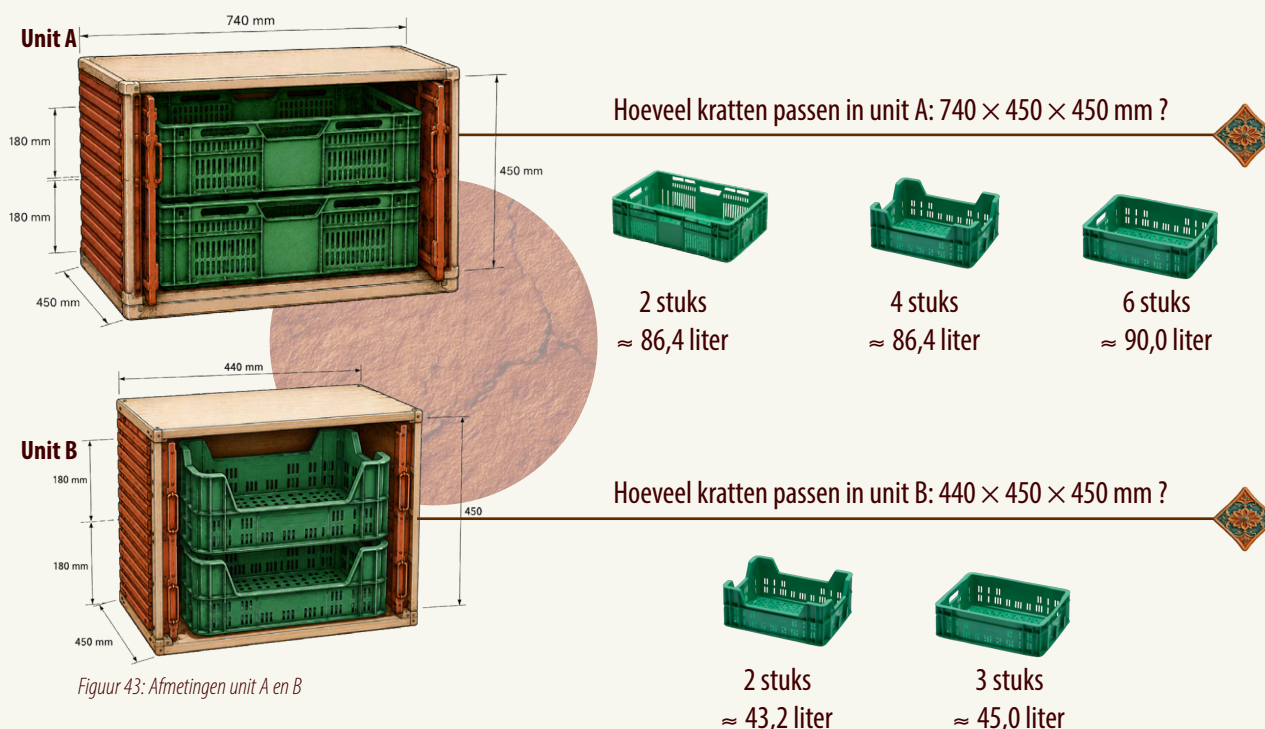
Nu de binnenmaten bepaald zijn, konden de wandopbouw en de buitenmaten verder uitgewerkt worden. De keuze van de materialen speelt hierbij een belangrijke rol omdat ze mee bepalen hoe goed het systeem isoleert, hoeveel het weegt en hoeveel het uiteindelijk kost.

Materiaalkeuze: opslagunits

Voor de opslagunits werd gekozen voor HDPE (high-density polyethyleen). Dit materiaal wordt ook gebruikt in professionele koelcellen omdat het voedselveilig, vochtbestendig, licht en eenvoudig te reinigen is. Daarnaast is het sterk genoeg voor de structurele opbouw van de units.

Als isolatie werd gekozen voor PUR-schuim (polyurethaan) met een warmtegeleidingscoëfficiënt van $\lambda = 0,023 \text{ W/mK}$. PUR behoort tot de best isolerende materialen die commercieel beschikbaar zijn en maakt het mogelijk om met een relatief dunne wand toch een goede isolatie te behalen.

De achterwand vormt een uitzondering op deze opbouw. Daar wordt de klassieke sandwichwand vervangen door de actieve zeerpot-wand die tegelijk het koelende element van het systeem vormt.



Materiaalkeuze: windtoren

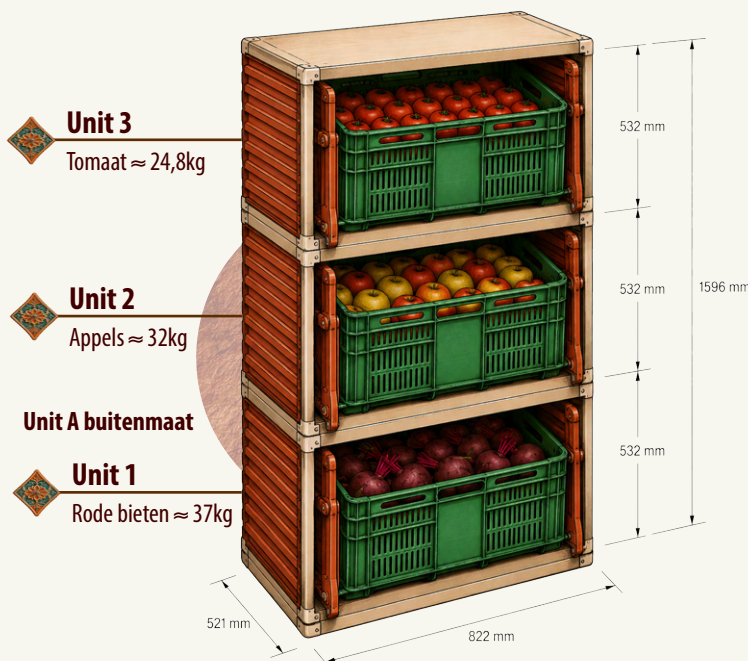
De windtoren heeft een andere functie dan de opslagunits. Deze toren geleidt de luchtstroom langs de zeerpot-wanden en verbindt de verschillende units met elkaar. Omdat de toren zelf niet gekoeld moet worden, lag de focus vooral op een materiaal dat stevig, vochtbestendig, licht en betaalbaar is.

Verschillende materialen werden vergeleken, maar uiteindelijk werd opnieuw gekozen voor HDPE. Het materiaal bleek sterk genoeg voor deze toepassing en heeft als bijkomend voordeel dat zowel de units als de windtoren uit hetzelfde materiaal opgebouwd kunnen worden. Dit vereenvoudigt de productie en assemblage van het systeem.

Structurele sterkte van de wandconstructie

Een belangrijke ontwerp vraag was of de onderste unit het volledige gewicht van de gestapelde toren kan dragen. Unit 1 draagt namelijk niet alleen het eigen gewicht, maar ook het gewicht van de bovenliggende units en de opgeslagen gewassen.

Voor deze berekening werd rode biet gekozen als maatgevend gewas voor unit 1. Rode biet behoort tot de zwaardere lokaal geteelde gewassen en heeft een hoge bulkdichtheid. Door met deze worst-case situatie te rekenen, wordt de structurele belasting bewust zwaarder ingeschat dan in veel andere praktijksituaties.



Figuur 44: Sterkte berekening

Het volledige gewicht wordt gedragen door de omtrek van de HDPE-wanden van de onderste unit. HDPE heeft een druksterkte tussen 15 en 24 MPa, afhankelijk van het materiaaltype en de belastingstijd.

Voor deze berekening werd bewust gerekend met de veilige ondergrens van 15 MPa.

Omtrek unit 1: $2 \times (632 + 496) = 2.256 \text{ mm}$
Wanddikte HDPE: 3 mm
Contactoppervlak: $2.256 \times 3 = 6.768 \text{ mm}^2$
Draagvermogen: $6.768 \text{ mm} \times 15 \text{ N/mm}^2$
 $= 101.520 \text{ N} \approx 10.350 \text{ kg}$
Totale belasting: $\approx 94 \text{ kg}$
Veiligheidsfactor: $10.350 / 94 = 110 \times$

Een veiligheidsfactor van 110 betekent dat de constructie theoretisch pas zou bezwijken bij een belasting van meer dan 10 ton, terwijl de werkelijke belasting rond 94 kg ligt. De berekening toont dus aan dat de 3 mm dikke HDPE-constructie structureel ruim voldoende sterk is.

Wandopbouw en wanddikte

De wanden van de units worden opgebouwd als een sandwichconstructie met drie lagen:

buitenwand: 3 mm HDPE
isolatielaag: 35 mm PUR-schuim ($\lambda = 0,023 \text{ W/mK}$)
binnenwand: 3 mm HDPE

Dit geeft een totale wanddikte van 41 mm per zijde.

Buitenmaten

Nu de binnenmaten en wanddiktes bepaald zijn, konden ook de buitenmaten van de units berekend worden.

Unit A: buitenmaat

Breedte	822
Hoogte	532
Diepte	521

Unit B: buitenmaat

Breedte	522
Hoogte	532
Diepte	521

De zeerpot-wand als koelend element

De zijwand van elke unit die in contact staat met de windtoren is geen gewone geïsoleerde wand, maar een actieve zeerpot-wand. Deze wand zorgt voor de verdampingskoeling binnen het systeem.

Via de windtoren wordt lucht van onder naar boven langs deze vochtige kleiwand gestuurd. Tijdens die luchtstroom verdampt water uit de wand, waardoor de lucht afkoelt terwijl ze verder omhoog beweegt door de toren.

De actieve kleiwand heeft een afmeting van 450 mm × 450 mm en vormt het verdampingsoppervlak van de unit. In dit hoofdstuk wordt onderzocht of dit beschikbare oppervlak voldoende groot is om de gewenste koeling te bereiken bij de luchtstroming in de windtoren.

Opbouw van de zeerpot-wand

De zeerpot-wand bestaat uit drie lagen die samen zorgen voor een gecontroleerde verdamping:

- een buitenste laag van 10 mm poreuze gebakken klei,
- een middelste laag van 20 mm zand- en watermengsel,
- en een totale wanddikte van 30 mm.

De keuze voor een kleidikte van 10 mm is gebaseerd op literatuuronderzoek. Volgens Victori & Nanjundaswamy (2014) ligt de optimale wanddikte tussen 8 en 12 mm. Een te dunne wand droogt snel uit waardoor het koelend effect verdwijnt, terwijl een dikkere wand het vochttransport vertraagt. Met 10 mm bevindt de wand zich dus midden in het optimale bereik.

Berekening van het benodigde verdampingsoppervlak

Om te onderzoeken of de kleiwand van 450 × 450 mm voldoende groot is, werd eerst gekeken naar de warmtelast van de unit. De actieve kleiwand heeft een totaal oppervlak van 0,2025 m² (0,450 × 0,450). Daarna werd berekend hoeveel lucht langs de wand stroomt en hoeveel koelvermogen de verdamping theoretisch kan leveren.

Warmtelast van de unit

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van een kelderruimte van 15°C bij 40% relatieve luchtvochtigheid. Bij deze omstandigheden ligt de nat-bol-temperatuur rond 8°C. Dit is de theoretisch laagst haalbare temperatuur via verdampingskoeling en wordt daarom gebruikt als doeltemperatuur voor het systeem.

Voor deze stap wordt de unit als leeg beschouwd. Er wordt dus enkel gekeken naar het warmteverlies via de geïsoleerde wanden.

De U-waarde van de wand werd berekend met:

$$U = \lambda / d$$

waarbij:

$$\begin{aligned} U &= \text{warmtedoorgangscoefficiënt van de wand [W/m}^2\text{K]} \\ \lambda &= 0,023 \text{ W/mK} = \text{warmtegeleidingscoëfficiënt van PUR-schuim} \\ d &= 0,035 \text{ m} = \text{dikte van de PUR-isolatielaag} \end{aligned}$$

Daarna werd het totale warmteverlies door de wanden berekend:

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

waarbij:

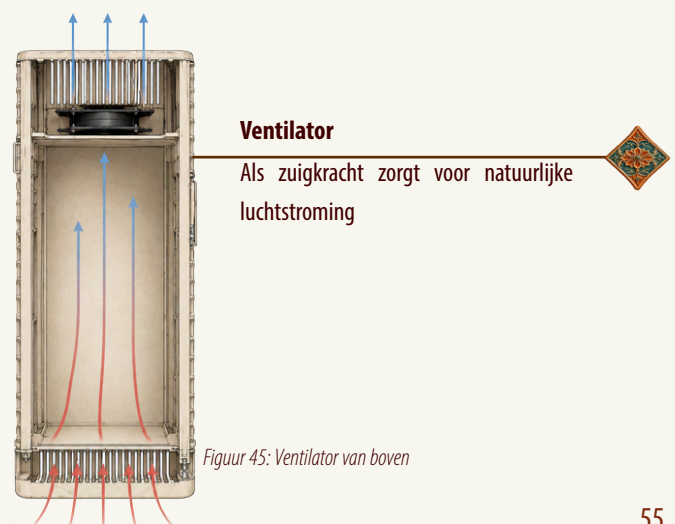
$$\begin{aligned} Q &= \text{warmteverlies [W]} \\ U &= 0,657 \text{ W/m}^2\text{K} \\ A &\approx 1,2 \text{ m}^2 = \text{totaal wandoppervlak van Unit A} \\ \Delta T &= 15 - 8 = 7^\circ\text{C} = \text{temperatuurverschil tussen kelder en unit} \end{aligned}$$

De totale warmtelast van de lege unit bedraagt dus ongeveer 5,5 W.

Positie van de ventilator

Voordat de luchtsnelheid langs de wand berekend werd, werd eerst onderzocht waar de ventilator het best geplaatst kon worden. Tijdens overleg met de HVAC-expert werd geadviseerd om de ventilator bovenaan het systeem te plaatsen en als zuigkracht te laten werken in plaats van lucht onderaan naar boven te blazen. (Figuur 45)

Volgens de expert werkt deze opstelling efficiënter omdat ze aansluit bij de natuurlijke luchtstroming in het systeem. Warme lucht stijgt van nature naar boven door het verschil in dichtheid. Door de ventilator bovenaan te plaatsen wordt deze natuurlijke convectie ondersteund in plaats van tegengewerkt. Hierdoor moet de ventilator minder weerstand overwinnen en kan dezelfde luchtstroom met minder energieverlies bereikt worden (Gagner-Toomey Associates, n.d.).



Figuur 45: Ventilator van boven

Daarnaast heeft een zuigende opstelling nog een tweede voordeel. De warmte die door de ventilatormotor geproduceerd wordt, wordt samen met de vochtige afvoerlucht bovenaan afgevoerd. Bij een blazende opstelling blijft die warmte meer in het systeem aanwezig, waardoor ze de koeling gedeeltelijk tegenwerkt. Dit effect werd ook opgemerkt tijdens de prototypetesten met drie PC-ventilatoren, waarbij de ventilatoren samen ongeveer 30 W extra warmte toevoegden aan het systeem. Hierdoor lag de gemeten temperatuur ongeveer 0,6°C hoger dan de theoretische doeltemperatuur.

Hoewel geen exacte efficiëntieverhouding tussen zuig- en blaasventilatie werd teruggevonden in de literatuur, blijkt wel dat verdampingskoelsystemen voor verse producten meestal werken met een zuigventilator die lucht door het koelend oppervlak trekt (Evapolar, 2023). Op basis van zowel het advies van de HVAC-expert als de literatuur werd daarom gekozen voor een ventilator die bovenaan de windtoren geplaatst wordt.

Luchtsnelheid langs de wand

Wetenschappelijk onderbouwde streefsnelheid

Haghighi & Or (2013) tonen aan dat bij een parallelle luchtstroom van 1,5 m/s langs een verzadigd poreus oppervlak de verdampingssnelheid optimaal is. Dit is de streefsnelheid die aangehouden wordt voor de dimensionering van de ventilator.

Verdampingsflux bij 1,5 m/s

Om te bepalen hoeveel koelvermogen de natte kleiwand theoretisch kan leveren, wordt de verdampingsflux berekend op basis van een parallelle luchtstroom van 1,5 m/s.

Volgens Haghighi & Or (2013) bedraagt de verdampingssnelheid bij een parallelle luchtstroom van 1,5 m/s langs een volledig verzadigd poreus oppervlak ongeveer 75 g/m²h. Dit betekent dat per uur ongeveer 75 gram water verdampt per vierkante meter kleioppervlak. De omrekening naar koelvermogen gebeurt via de verdampingswarmte van water:

$$\text{flux} = (\dot{m} \times L) / 3.600$$

waarbij:

flux = koelvermogen per vierkante meter [W/m²]

$\dot{m}$ = verdampingssnelheid [g/m²h]

L = 2.450 J/g = verdampingswarmte van water

3.600 = omrekening van uur naar seconde

$$\text{flux} = (75 \times 2.450) / 3.600 = 51 \text{ W/m}^2$$

Met een wandoppervlak van 0,2025 m² geeft dit:

$$\text{Koelcapaciteit} = 0,2025 \times 51 = 10,3 \text{ W}$$

$$\text{Warmtelast} = 5,5 \text{ W}$$

Om te berekenen hoeveel kleioppervlak minimaal nodig is:

$$A_{\text{min}} = 5,5 / 51 = 0,108 \text{ m}^2$$

$$\text{Beschikbaar oppervlak: } 0,2025 \text{ m}^2$$

$$0,2025 / 0,108 = 1,87$$

De beschikbare kleiwand is dus ongeveer 1,87 keer groter dan het theoretisch minimum. Dit zorgt voor extra reserve wanneer de klei niet volledig verzadigd is of wanneer de luchtstroming minder ideaal verloopt.

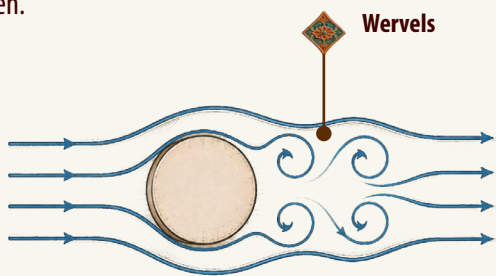
Optimalisatie van de verdamping via turbulentie en ribgeometrie

Tijdens overleg met de HVAC-expert werd aangeraden om turbulentie langs het kleioppervlak te creëren om de verdamping te verbeteren. Het doel hiervan is om wervelingen achter het oppervlak te creëren zodat de verzadigde luchtlaag direct aan de kleiwand voortdurend vervangen wordt door drogere lucht. Hierdoor blijft de dampdrukgradiënt groter en kan de verdamping efficiënter blijven verlopen.

Toch bracht dit advies een nieuw spanningsveld naar voren vanuit de eerdere prototypetesten. Tijdens test 2, waarbij een ventilator op ongeveer 500 mm afstand loodrecht op een klassieke zeerpot gericht stond, bleek dat de koeling niet gelijkmatig verdeeld was. Enkel op de plaatsen waar de lucht rechtstreeks het oppervlak raakte ontstonden sterk gekoelde zones, terwijl andere delen van de wand veel minder actief bleven.

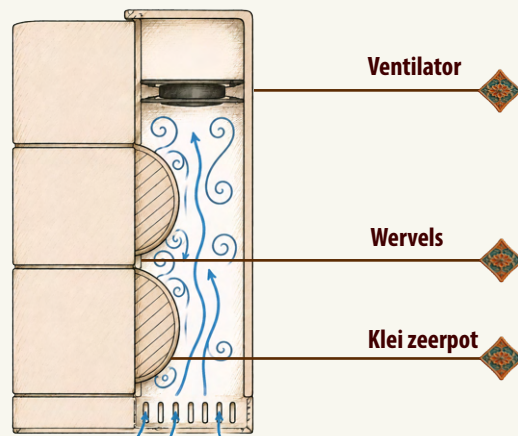
De conclusie uit deze test was dat turbulentie wel degelijk nuttig is, maar dat deze over het volledige oppervlak verdeeld moet worden en niet slechts lokaal op één impactpunt mag ontstaan.

Om de gewenste turbulentie te bereiken werd verder onderzocht welk stromingsregime nodig is. Daarbij speelt het Reynolds-getal een belangrijke rol. Dit getal bepaalt of een stroming laminair blijft of overgaat naar turbulente wervelingen rond een obstakel. Voor dit systeem is vooral het regime van de volledig turbulente wervelstraat interessant, namelijk het gebied waarbij $150 \leq Re < 3 \times 10^5$. In dit regime ontstaan achter een obstakel voortdurend wervelingen die de luchtlaag aan het oppervlak blijven verstoren en verversen. Daardoor neemt de convectie toe en kan de verdamping efficiënter verlopen.



Figuur 46: Wervels

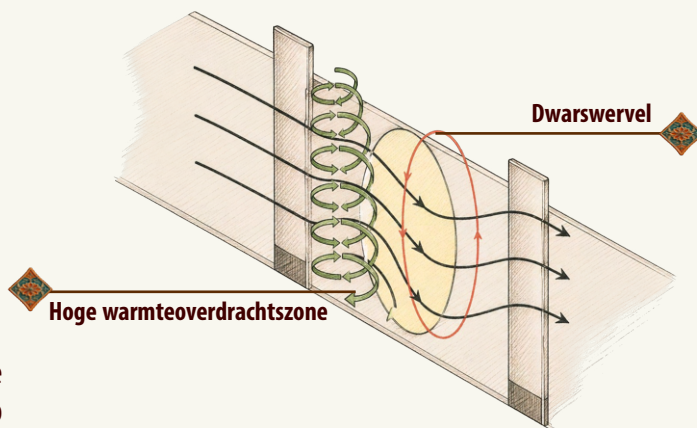
Uit de literatuur bleek echter dat deze sterke turbulente wervelstraten vooral ontstaan wanneer de lucht loodrecht op een cilindrisch obstakel botst. In figuur 47 is te zien dat zo'n vorm theoretisch ook parallel geplaatst kan worden door de kleiwand als een halve cilindervorm op te bouwen. Praktisch bleek dit echter moeilijk produceerbaar in klei, zeker binnen de doelstelling van eenvoud en lage productiekost.



Figuur 47: Parallel met wervels

Daarom werd verder onderzocht welke geometrieën turbulentie kunnen creëren bij een parallelle luchtstroming langs de wand. Tijdens overleg met een andere engineeringexpert werd aangeraden om vormen toe te voegen die de mooie laminaire stroming bewust onderbreken. Volgens de expert konden dit platen, obstakels of niet-gladde oppervlakken zijn die verstoringen in de luchtstroom veroorzaken en zo de grenslaag blijven verversen.

Vanuit dit advies werd verder gezocht naar geometrieën die zowel turbulentie creëren als praktisch produceerbaar blijven binnen het systeem. Bij verdere studie van de literatuur bleek dat diagonale ribben onder een hoek van 45° ten opzichte van de luchtstroming zeer interessante resultaten geven. Deze zogenaamde angled rib turbulators zorgen ervoor dat lucht parallel langs het oppervlak kan blijven bewegen terwijl toch over de volledige wand turbulentie ontstaat.



Figuur 48: Diagonale ribben

Volgens Han et al. (1991) creëren deze diagonale ribben een secundaire stroming die de grenslaag voortdurend over het volledige oppervlak verversen. Daardoor blijft de verzadigde luchtlaag aan het kleioppervlak niet hangen en kan de verdamping efficiënter verlopen. Ook Haghighi & Or (2013) tonen aan dat deze continue verversing van de grenslaag de verdampfingsflux verhoogt.

Op basis van deze literatuur werden de ribs specificaties van de kleiwand als volgt vastgelegd:

ribhoek: 45°
ribhoogte: 5 mm
ribafstand: 35 mm
p/e-verhouding: $35 / 5 = 7$
aantal ribben: ongeveer 14

De verhouding van 7 valt binnen het optimale bereik van 6 tot 10 volgens Han et al. (1991).



Figuur 49: zeerpot met diagonale ribben

Door de ribben toe te voegen ontstaat niet alleen meer turbulentie, maar ook extra oppervlakte. De ribstructuur creëert ongeveer 0,089 m² bijkomend actief oppervlak.

Hierdoor stijgt het totale actieve kleioppervlak van:

$$0,2025 \text{ m}^2 \rightarrow 0,2915 \text{ m}^2$$

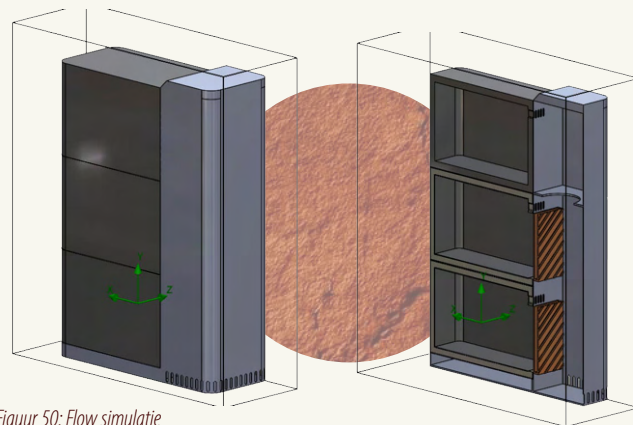
Wanneer dezelfde berekening opnieuw uitgevoerd wordt met het grotere oppervlak ontstaat:

$$\begin{aligned} \text{Koelcapaciteit} &= 0,2915 \times 51 = 14,87 \text{ W} \\ \text{Veiligheidsmarge} &= 14,87 / 5,5 = 2,71 \end{aligned}$$

Door de diagonale ribstructuur stijgt de veiligheidsmarge dus van $\times 1,87$ naar ongeveer $\times 2,71$. Hierdoor krijgt het systeem extra reserve voor situaties waarin de klei niet volledig verzadigd is of de luchtstroming minder ideaal verloopt.

CFD-validatie via SolidWorks Flow Simulation

Om te controleren of de gekozen 45° angled rib turbulators effectief turbulentie creëren bij een lichtsnelheid van 2 m/s, werd een CFD-simulatie uitgevoerd in SolidWorks Flow Simulation. Het doel van deze simulatie was niet om de exacte koelprestatie te berekenen, maar om visueel te controleren of de luchtstroming zich gedraagt zoals voorspeld in de literatuur van Han et al. (1991).

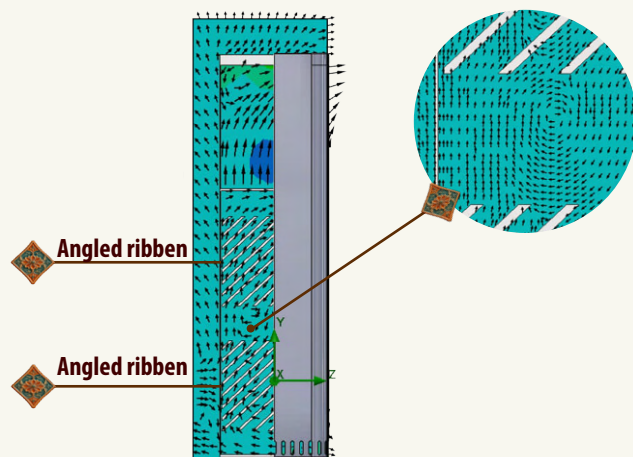


Figuur 50: Flow simulatie

Doorsnede

Waarnemingen van de luchtstroming

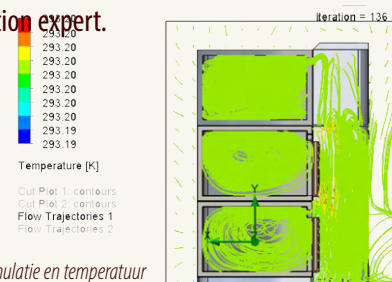
In de simulatie zijn twee duidelijke effecten zichtbaar. Ten eerste tonen de vectoren tussen de ribben dat de lucht niet gewoon recht omhoog stroomt, maar door de schuine ribben zijwaarts wordt gestuurd. Hierdoor ontstaat een secundaire luchtstroming over het oppervlak. Daarnaast is in de detailweergave een duidelijk draaiend stromingspatroon zichtbaar. De pijlen vormen kleine cirkelvormige bewegingen rond bepaalde punten, wat wijst op de vorming van wervelingen achter de ribben. De simulatie bevestigt dus visueel dat de gekozen ribgeometrie effectief turbulentie creëert bij de ontworpen lichtsnelheid.



Figuur 51: Flow simulatie in turbulentie

Temperatuursimulatie: beperking van Solidworks

In een tweede simulatie werd geprobeerd het temperatuurverloop zichtbaar te maken. Daarbij ontstond bijna geen temperatuurverschil in de simulatie (Figuur 52). Dit komt doordat SolidWorks Flow Simulation geen echte verdampingskoeling kan simuleren. De software berekent enkel temperatuurveranderingen door luchtfrictie en drukverschillen, maar niet door de faseovergang van water naar waterdamp. Dit werd ook bevestigd door een SolidWorks Flow Simulation expert.



Figuur 52: Flow simulatie en temperatuur

Watertoevoer: capillaire werking en vacuumreservoir

Een belangrijke ontwerp vraag was hoe de zeerpot-wand voortdurend van water voorzien kan worden zonder extra elektriciteit of complexe technologie te gebruiken. Tijdens brainstormsessies werden verschillende mogelijkheden onderzocht.

Verkenning van watertoevoermethoden

Verschillende systemen werden bekeken: een actieve pomp, een druppelirrigatiesysteem, manueel bijvullen via een opening bovenaan en een passief waterreservoir op basis van capillaire werking.

Elke methode werd geëvalueerd op vlak van complexiteit, elektriciteitsverbruik en betrouwbaarheid. Een actieve pomp vraagt extra elektriciteit en gaat in tegen de doelstelling van een energiezuinig systeem. Druppelirrigatie vraagt een nauwkeurige afstelling en kan verstopen. Manueel bijvullen is eenvoudig maar vraagt dagelijkse aandacht van de boer.

Capillaire werking als natuurlijk principe

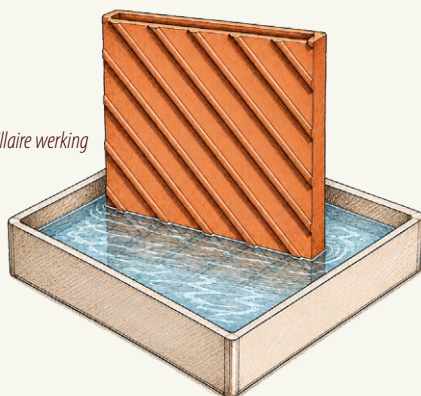
Tijdens de prototypetest werd opgemerkt dat er water onderaan de opstelling uitlekte. In plaats van dit als verlies te zien, werd onderzocht of dit water opnieuw gebruikt kon worden binnen het systeem.

Door terug te kijken naar de essentie van de thesis, traditionele kennis en natuurinspiratie, bleek de oplossing eigenlijk al in het materiaal zelf te zitten. Klei heeft van nature een sterke capillaire werking. Water wordt via de kleine poriën in de klei vanzelf omhoog gezogen zonder dat daar energie voor nodig is.

In overleg met de klei expert werd daarom beslist om het waterreservoir rechtstreeks onder de zeerpotwand te plaatsen en de capillaire werking het werk te laten doen. De zeerpot staat ongeveer 2 cm diep in het water, over een breedte van 45 cm en een diepte van 4 cm.

Volgens de expert hangt de capillaire stijghoogte sterk af van het type klei. Op basis van praktijkervaring gaf hij aan dat bij deze kleisoorten een stijghoogte tot ongeveer de helft van de wand realistisch is.

Figuur 53: Capillaire werking



Wetenschappelijke onderbouwing

Om dit praktijkadvies wetenschappelijk te onderbouwen wordt de capillaire stijghoogte berekend voor het specifieke kleitype dat gebruikt wordt: Draaiklei 10SF02, roodbakend, 25% chamotte 0-0,2 mm, baktemperatuur 1000-1200°C, van Witgert.

Uit technische data van vergelijkbare Witgert roodbakende chamotteklei blijkt een wateropname van 8% bij 1000°C. Dit betekent dat 8% van het volume bestaat uit open verbonden poriën. Op basis van deze open porositeit en de typische poriëngrootteverdeling van roodbakende chamotteklei ligt de gemiddelde poriënstraal op circa 5 tot 10 µm.

Via de Jurin-wet wordt de theoretische capillaire stijghoogte berekend:

$$h = (2 \times \gamma \times \cos\theta) / (\rho \times g \times r)$$

waarbij:

h = capillaire stijghoogte [m]

$\gamma = 0,0728$ N/m (oppervlaktespanning van water),

$\cos\theta = 1$ (klei is volledig hydrofiel) (contacthoek tussen water en klei),

$\rho = 1000$ kg/m³ (dichtheid van water)

$g = 9,81$ m/s² (zwaartekrachtsversnelling)

r = gemiddelde poriënstraal van de klei [m]

Bij $r = 5$ µm: $h = 0,1456 / (1000 \times 9,81 \times 5 \times 10^{-6}) = \sim 3,0$ meter

Bij $r = 10$ µm: $h = 0,1456 / (1000 \times 9,81 \times 1 \times 10^{-5}) = \sim 1,5$ meter

Deze theoretische waarden moeten kritisch bekeken worden. Wetenschappelijk onderzoek toont aan dat de werkelijke capillaire stijghoogte in poreuze materialen die verdampen lager uitvalt dan de Jurin-wet voorspelt, omdat verdamping aan het oppervlak de beperkende factor wordt. Bij filtermateriaal werd een vermindering van factor 3 tot 8 gemeten ten opzichte van de theoretische hoogte. Belangrijk: dit betrof filtermateriaal en niet gebakken klei, de werkelijke factor voor chamotteklei is niet precies gekend maar geeft wel een realistische bandbreedte.

Bij een poriënstraal van 5 µm:

Theoretisch: 3,0 m

Optimistisch (factor 3): $3.000 / 3 = 1.000$ mm → volledige wand ✓

Conservatief (factor 8): $3.000 / 8 = 375$ mm = 83% van de wandhoogte van 450 mm

Maar de veiligheidsmarge van het verdampingsoppervlak bedraagt $\times 2,71$. Het systeem heeft dus 2,71 keer meer kleiwandoppervlak dan het minimum. Zelfs als slechts 83% van de wand effectief bevochtigd wordt, blijft de koelcapaciteit ruimschoots voldoende.

Bij een poriënstraal van 10 µm:

Theoretisch: 1,5 m
Optimistisch (factor 3): $1.500 / 3 = 500 \text{ mm} \rightarrow$ net boven de wandhoogte van 450 mm ✓
Conservatief (factor 8): $1.500 / 8 = 187,5 \text{ mm} = 42\%$ van de wandhoogte

Ook bij de slechtste combinatie van grote poriën en hoge verdampingsbegrenzing wordt nog steeds 42% van de wand bevochtigd. Met de veiligheidsmarge van $\times 2,71$ blijft dit voldoende om de warmtelast van de unit te compenseren.

Extra bevochtiging

Mocht de capillaire werking van de kleiwand in de praktijk minder ver reiken dan de theoretische berekening voorspelt, bestaat er een eenvoudige passieve oplossing. Door katoenen of synthetische vezels verticaal in het waterreservoir te plaatsen die langs de buitenzijde van de zeerpotwand omhoog lopen, kan het water via de capillaire werking van de vezels naar de bovenste zone van de wand getransporteerd worden. De vezels bevochtigen de buitenkant van de kleiwand van bovenaf, waarna de kleiwand het vocht zelf verder naar binnen transporteert. Dit principe, bekend als wickwerking, is volledig passief, vereist geen elektriciteit en sluit aan op de low tech filosofie van het systeem. Het vormt een interessante piste voor verder onderzoek en praktijktesting.

Conclusie

De capillaire werking van de roodbakkende chamotteklei 10SF02 is wetenschappelijk onderbouwd voldoende om de zeerpotwand passief te bevochtigen vanuit een waterreservoir van 2 cm diep onderaan. Zelfs in het meest conservatieve scenario blijft de koelcapaciteit gewaarborgd dankzij de ruime veiligheidsmarge in het wandoppervlak. Het systeem vereist geen pomp, geen elektriciteit en geen dagelijkse bijsturing. De capillaire werking van de klei doet het werk volledig passief.

Vacuümreservoir als passieve oplossing

Om te vermijden dat de boer het waterreservoir dagelijks moet bijvullen, wordt gekozen voor een vacuümreservoir onderaan de zeerpotwand. Als inspiratie hiervoor dient de klassieke sifondrinker voor kippen, een systeem dat al jarenlang gebruikt wordt in de pluimveehouderij en volledig passief werkt zonder pomp of sensoren.

Het systeem bestaat uit een afgesloten reservoir met twee doppen. De bovenste dop dient voor het bijvullen van het water. De onderste opening regelt de watertoevoer naar de waterbak onder de zeerpotwand.

De werking is gebaseerd op een vacuümeffect. Wanneer het reservoir gevuld en afgesloten is, houdt het vacuüm het water tegen. Zolang de onderste opening onder het waterniveau zit, kan er geen lucht in het reservoir komen en blijft het water opgeslagen. Zodra het waterniveau daalt door verdamping, komt er via de onderste opening een kleine luchtbel binnen. Hierdoor wordt het vacuüm kort verbroken en stroomt een kleine hoeveelheid water naar buiten. Daarna sluit het systeem zichzelf opnieuw af.

Op deze manier blijft het waterniveau automatisch constant op ongeveer 2 cm, zonder elektriciteit, sensoren of actieve regeling.

Bij het bijvullen wordt eerst de bovenste dop geopend terwijl de onderste gesloten blijft (Figuur 54). Zo blijft het water in het reservoir opgeslagen tijdens het vullen. Pas wanneer beide doppen opnieuw correct geplaatst zijn en het reservoir omgekeerd wordt teruggedezet, begint het vacuümprincipe opnieuw te werken.

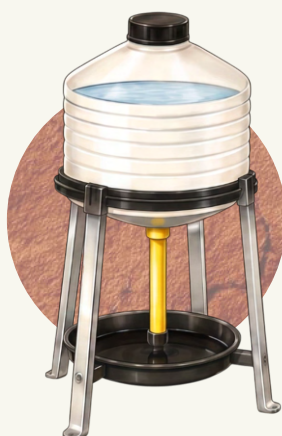
Daardoor blijft de onderzijde van de zeerpotwand voortdurend in contact met water, waarna de klei het vocht via capillaire werking verder over het oppervlak verspreidt. Het volledige systeem werkt dus volledig passief en vraagt nauwelijks dagelijkse tussenkomst van de boer.

De waterstroom stopt automatisch zodra de buis het water raakt. Wanneer het waterniveau daalt, komt er lucht vrij en stroomt er opnieuw water uit totdat het gewenste niveau weer is bereikt.

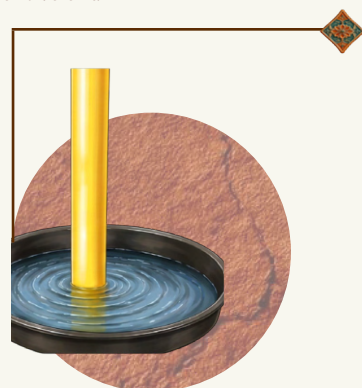


60.

Dit moet gesloten blijven zodat vacuüm werkt



Figuur 54: Vacuümreservoir



Berekening waterverbruik en reservoirgrootte

Om te bepalen hoe groot het waterreservoir moet zijn en hoe vaak het bijgevuld moet worden, werd het waterverbruik per unit berekend op basis van de verdampingssnelheid.

$$140 \text{ g/m}^2 \times 0,18 \text{ m}^2 = 25,2 \text{ g/h}$$

Dit betekent dat één unit ongeveer 25,2 gram water per uur verdampt.

Per dag geeft dit:

$$25,2 \times 24 = 605 \text{ g} \approx 0,6 \text{ liter/dag}$$

Per week:

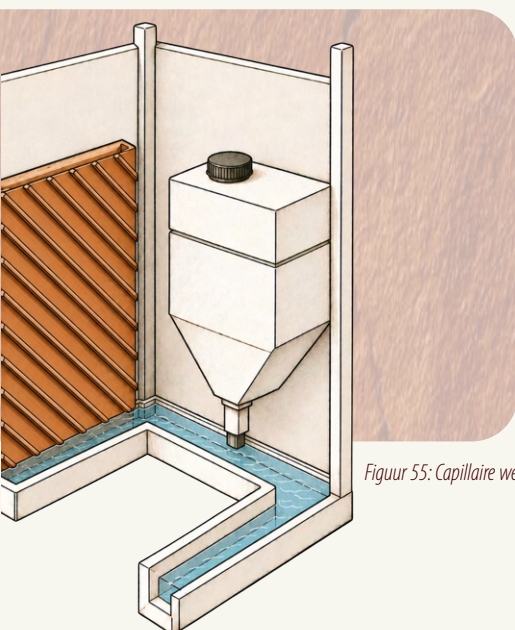
$$0,6 \times 7 = 4,2 \text{ liter/week}$$

Om extra reserve te voorzien wordt een veiligheidsmarge van $\times 1,7$ toegepast:

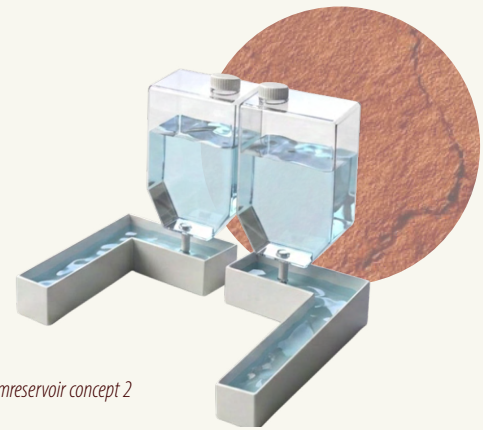
$$4,2 \times 1,7 \approx 7 \text{ liter/week}$$

Per unit is ongeveer 7 liter water per week nodig. Een eerste idee was om twee tegenover elkaar liggende units één gemeenschappelijk reservoir van 15 liter te laten delen. Om beide units een volledige week van water te voorzien, zou dit reservoir ongeveer $35 \times 29 \times 15 \text{ cm}$ groot moeten zijn.

In figuur 2 is echter te zien dat een gemeenschappelijk reservoir enkele praktische nadelen met zich meebrengt. Wanneer één van beide units niet gebruikt wordt, blijft er toch water naar die zijde stromen. Daarom werd een tweede iteratie onderzocht waarbij elke unit een afzonderlijk reservoir krijgt. Op die manier wordt enkel water verbruikt door de units die effectief in gebruik zijn, zoals weergegeven in figuur 2.



Figuur 55: Capillaire werking met vacuümreservoir

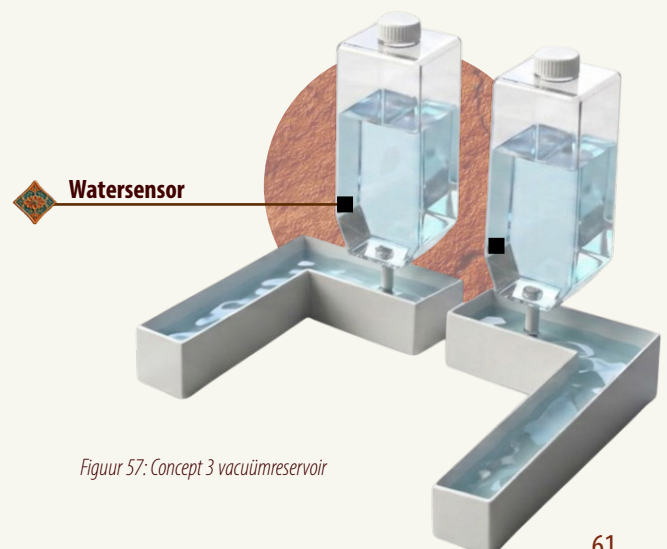


Figuur 56: Vacuümreservoir concept 2

Aanvankelijk werd uitgegaan van reservoirs van 7 liter per unit, maar deze namen te veel ruimte in beslag. Hierdoor zou de doorsnede van de windtoren aanzienlijk groter worden, terwijl het net de bedoeling is om het systeem zo compact mogelijk te houden. Bovendien mag het reservoir niet voor de kleiwand geplaatst worden omdat dit de luchtstroom en verdamping zou hinderen. Daarom werd gekozen voor een compacter reservoir van ongeveer 3,5 liter per unit, met afmetingen van circa $35 \times 12 \times 8,5 \text{ cm}$. Hierdoor blijft de integratie haalbaar binnen de beschikbare ruimte, al moet het reservoir ongeveer twee keer per week worden bijgevuld. Om dit gebruiksvriendelijk te houden, wordt een watersensor voorzien die via de applicatie een melding stuurt wanneer het waterniveau te laag wordt.

Daarom werd uiteindelijk gekozen om elke unit een eigen reservoir te geven. In plaats van één reservoir van 7 liter per unit wordt gewerkt met een compacter reservoir van ongeveer 3,5 liter, met afmetingen van circa $35 \times 12 \times 8,5 \text{ cm}$ (3,57 liter). Hierdoor moet de boer het reservoir ongeveer twee keer per week bijvullen, maar blijft de opbouw van het systeem eenvoudiger en beter integreerbaar binnen de beschikbare ruimte.

Om dit gebruiksgemak verder te verhogen, wordt een watersensor toegevoegd. Wanneer het waterniveau te laag wordt, ontvangt de gebruiker automatisch een melding via de applicatie zodat het reservoir tijdig kan worden bijgevuld.



Figuur 57: Concept 3 vacuümreservoir

Benodigde luchtverversing

Tijdens zowel de prototypetesten als de theoretische analyse werd duidelijk dat de uitgaande lucht van het systeem steeds vochtiger wordt door de verdamping aan de kleiwanden. Wanneer deze vochtige lucht in de kelderruimte terechtkomt, stijgt de luchtvochtigheid van de ruimte zelf. Daardoor vermindert het verschil tussen droge lucht en verzadigde lucht aan het kleioppervlak, waardoor de verdamping minder efficiënt wordt en de koelprestatie van het systeem daalt.

Daarom werd in eerste instantie onderzocht of de uitlaatlucht rechtstreeks naar buiten afgevoerd moest worden. Vooraleer die keuze gemaakt kon worden, moest echter eerst berekend worden hoeveel vocht het systeem werkelijk aan de ruimte toevoegt en hoe snel de luchtvochtigheid hierdoor stijgt. Op basis daarvan kan bepaald worden of een directe afvoer naar buiten effectief noodzakelijk is.



Figuur 58: Bevochtiging

Luchtvochtigheid in de kelder: berekening

Om te onderzoeken hoe snel de luchtvochtigheid in een kleine opslagruimte stijgt, wordt als referentie een kleine kelder genomen van $2,5 \times 2,5 \times 1,8$ m. Door een relatief kleine ruimte te kiezen kan onderzocht worden hoe snel de uitgaande vochtige lucht van het systeem de ruimte beïnvloedt en of extra ventilatie noodzakelijk wordt.

Het volume van deze kelder bedraagt:

$$2,5 \times 2,5 \times 1,8 = 11,25 \text{ m}^3$$

De massa lucht in de kelder bedraagt:

$$11,25 \times 1,2 = 13,5 \text{ kg lucht}$$

De verdampingssnelheid bij een luchtsnelheid van 1,5 m/s bedraagt ongeveer 75 g/m²h over een actief kleioppervlak van 0,2025 m² per unit. Voor twee units samen geeft dit:

$$75 \times 0,2025 \times 2 = 30,4 \text{ g/h}$$

Er wordt dus ongeveer 30,4 gram water per uur aan de kelderlucht toegevoegd.

Bij een beginluchtvochtigheid van 40% relatieve vochtigheid en een temperatuur van 15°C stijgt het vochtgehalte per uur met:

$$30,4/13,5 = 2,25 \text{ g/kg per uur}$$

Na één uur stijgt het vochtgehalte dus van ongeveer 4,3 g/kg naar 6,55 g/kg. Dit komt overeen met ongeveer 62% relatieve vochtigheid bij 15°C.

Dit is een belangrijk punt, omdat verdampingskoeling minder efficiënt begint te werken boven ongeveer 60% relatieve vochtigheid. De lucht kan dan minder extra vocht opnemen, waardoor de verdamping en dus ook het koelend effect afnemen.

Daarom werd onderzocht of een standaard hygrostatisch gestuurde badkamerventilator voldoende is om deze vochtige lucht af te voeren.

Een standaard badkamerventilator heeft een debiet van ongeveer 100 m³/h. Bij een keldervolume van 11,25 m³ betekent dit dat de volledige lucht in de kelder ongeveer elke 7 minuten ververscht wordt:

$$11,25/100 = 0,11 \text{ uur} \approx 7 \text{ minuten}$$

In diezelfde 7 minuten produceert het systeem:

$$30,4/60 \times 7 = 3,5 \text{ g water}$$

De ventilator voert de vochtige lucht dus veel sneller af dan het systeem vocht toevoegt. Dit toont aan dat een hygrostatisch gestuurde badkamerventilator met een debiet van 100 m³/h voldoende is om de luchtvochtigheid onder controle te houden zodra de ingestelde grens van ongeveer 56% relatieve vochtigheid bereikt wordt. Een directe uitlaat naar buiten is daardoor niet noodzakelijk.



Figuur 58: Badkamer ventilator

Energieverbruik

Energieverbruik van het Boroud-systeem

Om het energieverbruik van de ventilator te berekenen, moet eerst bepaald worden hoeveel lucht er door de toren moet stromen. Dit noemen we het debiet: de hoeveelheid lucht die per tijdseenheid verplaatst wordt, uitgedrukt in m³/h (kubieke meter per uur).

Het debiet heeft een directe invloed op het energieverbruik van de ventilator. Een te laag debiet zorgt voor onvoldoende koeling, terwijl een te hoog debiet onnodig veel energie verbruikt. Daarom wordt eerst berekend welk debiet nodig is.

Stap 1: Debiet van het ontwerp

De toren heeft een doorsnede van 450 mm diep × 400 mm breed, wat overeenkomt met 0,18 m². De ventilator bevindt zich bovenaan op 1.200 mm hoogte en zuigt lucht aan via een opening van 400 × 80 mm onderaan de toren. Voor het systeem wordt uitgegaan van een luchtsnelheid van 1,5 m/s.

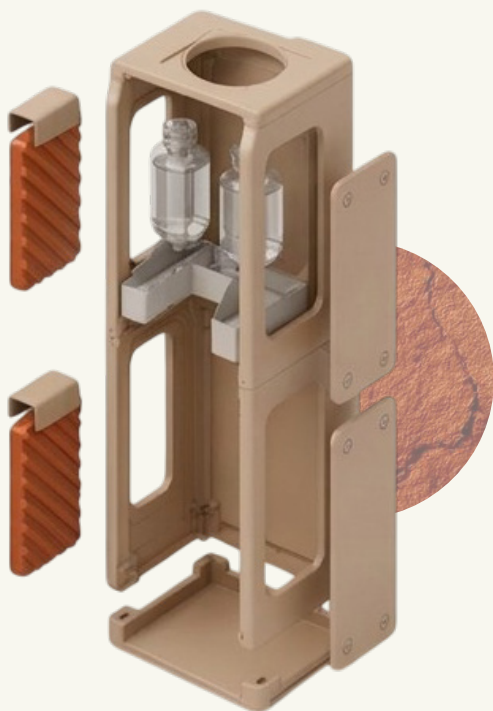
Debiet = doorsnede × luchtsnelheid

$$0,18 \times 1,5 = 0,27 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0,27 \times 3600 = 972 \text{ m}^3/\text{h}$$

Het benodigde debiet bedraagt dus 972 m³/h.

Figuur 59: Binnenkant windtoren



Voor een ventilator met een debiet van ongeveer 972 m³/h ligt het typische vermogen tussen 50 en 70 W. Voor de berekening wordt uitgegaan van 60 W. Deze ventilator bedient het volledige systeem, waarbij aan elke zijde van de toren drie opslagunits geplaatst zijn.

In totaal zijn er dus zes units aanwezig, waarvan vier units zowel gekoeld als bevochtigd worden en twee units voornamelijk als bevochtigingszone functioneren. Hierdoor wordt het volledige systeem aangedreven door één centrale ventilator van 60 W.

	Vermogen	Prijs
Per dag	1,44 kWh	€0,50
Per maand	43,2 kWh	€15,12
Per jaar	525,6 kWh	€183,96

Voor de vergelijking wordt uitgegaan van een klassieke koelcel van 12 m³ met bevochtiging en een bruikbare opslagcapaciteit van ongeveer 7.700 liter. De vergelijking gebeurt op basis van de energiekost per liter opslagcapaciteit per jaar.

	energieprijs/jaar	Opslag	Prijs
Koelcel	€3500	7700 L	€0,455/L
Boroud (6units)	€183	540L	€0,341/L

Uit de vergelijking blijkt dat Boroud een energiekost heeft van €0,341 per liter opslagcapaciteit per jaar, tegenover €0,429 per liter voor een klassieke koelcel met bevochtiging. Daarmee is Boroud ongeveer **25% energie-efficiënter** per liter opslagcapaciteit.

Energieverbruik van het Boroud-systeem

Bij verdere analyse bleek dat een groot deel van de toren ingenomen werd door de waterzone. De lucht stroomde daardoor door meer ruimte dan nodig was, wat resulteerde in een hoger debiet en dus een hoger energieverbruik.

Door een scheidingswand toe te voegen tussen de waterzone en de luchtkanaalzone waarin de zeerpotwand zich bevindt, kon de effectieve luchtdoorsnede sterk verkleind worden. De nieuwe luchtgang heeft afmetingen van 1.200 mm × 450 mm × 100 mm. Een ventilator bedient hierbij twee koelunits en één bevochtigingsunit.

De nieuwe doorsnede bedraagt:

$$0,45 \times 0,10 = 0,045 \text{ m}^2$$

Het nieuwe debiet wordt:

$$0,045 \times 1,5 = 0,0675 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0,0675 \times 3600 = 243 \text{ m}^3/\text{h}$$

Het benodigde debiet daalt dus van 972 m³/h naar 243 m³/h, maar dan wel voor 3 units in plaats van 6 units.

Hierdoor volstaat een ventilator van ongeveer 18 W.

	Vermogen	Prijs
Per dag	0,432 kWh	€0,15
Per maand	13 kWh	€4,50
Per jaar	157,7 kWh	€55,00

Energieverbruik van het volledige systeem

Naast de ventilator bevat het systeem ook enkele slimme componenten die temperatuur, luchtvochtigheid en waterniveau opvolgen en doorsturen naar de Boroud-app.

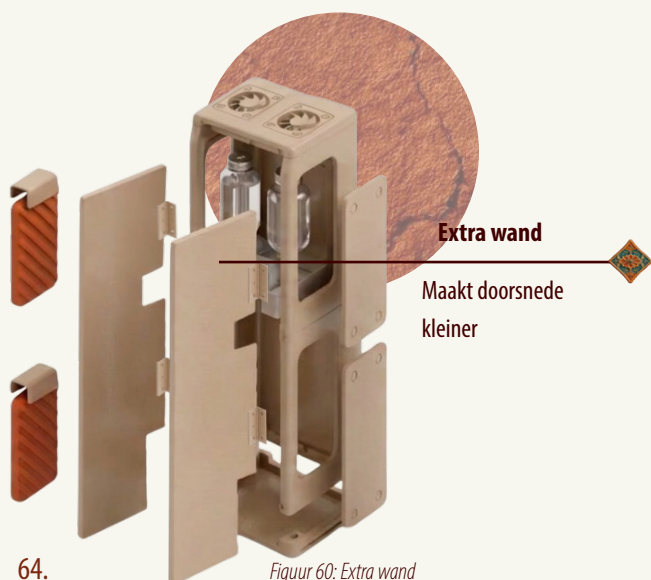
Component	Aantal	Vermogen	Totaal
Ventilator	1	18W	
ESP32 (wifi)	1	0,8W	
Watersensor	2	0,1W	
OLED-scherm	3	0,08W	
Temperatuur en vochtsensor	3	0,005W	
			19,26W

Uitgaande van een elektriciteitsprijs van €0,35 per kWh bedraagt de jaarlijkse energiekost bij continu gebruik ongeveer €59,10. Waarvan twee units zowel gekoeld als bevochtigd worden en één units voornamelijk als bevochtigingszone functioneert.

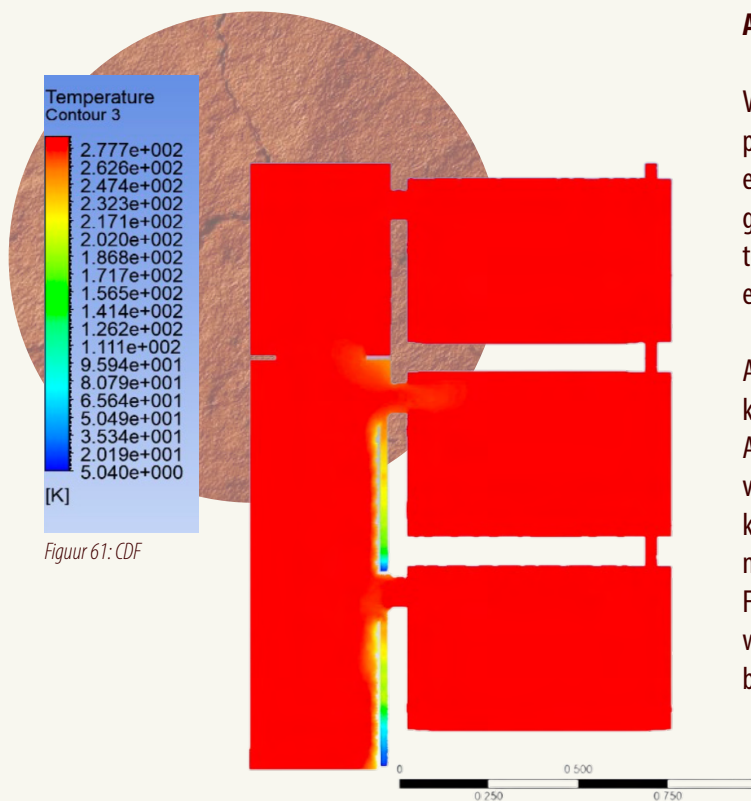
	Energieprijs/jaar	Vermogen	Prijs
Koelcel	€3500	7700 L	€0,455/L
Boroud (3units)	€59,10	270L	€0,219/L

Boroud is daarmee ongeveer **52% energiezuiniger** per liter opslagcapaciteit dan een klassieke koelcel met bevochtiging. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat een klassieke koelcel lagere temperaturen kan bereiken. Daar staat tegenover dat een koelcel doorgaans werkt met één vaste temperatuur voor de volledige opslagruimte, waardoor niet alle gewassen onder hun ideale bewaarcondities worden opgeslagen. Boroud biedt daarentegen verschillende opslagzones met aangepaste temperatuur- en vochtigheidsniveaus, waardoor meerdere gewassen tegelijk onder geschiktere omstandigheden bewaard kunnen worden. De vergelijking toont dus niet alleen een lagere energiekost per liter, maar ook het potentieel van Boroud om energie-efficiënte opslag beter af te stemmen op de specifieke behoeften van verschillende gewassen.

52% energiezuiniger



CFD-simulatie van Boroud



Figuur 61: CFD

Aanleiding en doelstelling

Voordat tijd en middelen werden geïnvesteerd in een volledig prototype, werd het koelprincipe eerst numeriek onderzocht via een CFD-simulatie (Computational Fluid Dynamics). Dit is een gebruikelijke stap binnen productontwikkeling omdat een simulatie toelaat om het gedrag van een systeem vooraf te voorspellen en te evalueren zonder meteen een fysiek prototype te bouwen.

Aangezien SolidWorks Flow Simulation het verdampingsproces niet kan modelleren, werd de CFD-simulatie rechtstreeks uitgevoerd in ANSYS Fluent. Verdampingskoeling is namelijk volledig afhankelijk van de faseovergang van vloeibaar water naar waterdamp aan het kleioppervlak. Daarom werd voor dit onderdeel samengewerkt met een externe CFD-expert die de simulatie uitvoerde in ANSYS Fluent, een professionele simulatiesoftware die faseovergangen, waterdamptransport en gekoppelde warmteoverdracht wel kan berekenen.

Softwareomgeving en opzet

Om het koelgedrag van het systeem te valideren werd een driedimensionale CFD-simulatie uitgevoerd in ANSYS Fluent. Hierbij werden de luchtstroom, warmteoverdracht en het waterdamptransport in het volledige systeem gemodelleerd. Het rekendomein omvatte de luchtinlaat en uitlaat, de centrale luchttoeren, de drie koelcompartimenten, de zeerpotwanden en de afsluitende panelen.

Advies van de CFD-expert: ventilatierooster per unit

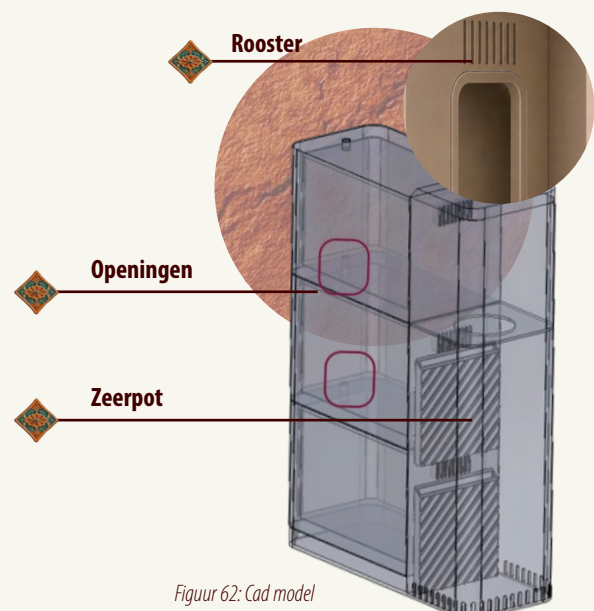
Tijdens de samenwerking met de CFD-expert werd aanbevolen om elke koelunit te voorzien van een ventilatierooster.

Dit heeft twee voordelen. Ten eerste zorgt het rooster ervoor dat de lucht beter verdeeld wordt over de drie compartimenten. Zonder rooster stroomt de lucht voornamelijk door de centrale luchttoeren omhoog, waardoor de koelunits minder bereikt worden. Door een rooster toe te voegen wordt een deel van de lucht naar elke unit geleid.

Ten tweede verbetert het rooster de uitwisseling van vochtige lucht tussen de windtoeren en de opslagruimtes. De verdamping vindt plaats aan de zeerpotwand in de windtoeren. Dankzij het rooster kan deze gekoelde en bevochtigde lucht ook effectief de opslagunits bereiken. Dit advies werd meegenomen in het definitieve ontwerp.

Fysische modellen

De simulatie werd uitgevoerd met een drukgebaseerde solver voor lage lichtsnelheden en niet-samendrukbare stroming. Hierbij werden een k-epsilon turbulentiemodel, de energievergelijking, species transport voor waterdamp en zwaartekracht geactiveerd. De natte kleiwand werd gemodelleerd als een verzadigd verdampend oppervlak.



Figuur 62: Cad model

Randvoorwaarden

Parameter	Waarde
Inlaattemperatuur	288,15 K (15°C)
Inlaat luchtvochtigheid	0,004 massafractie (~40% RV bij 15°C)
Natte kleiwand massafractie	0,02
Uitlaat	Drukuitlaat, 0 Pa
Ventilatoren	Twee verschillende ventilatoren getest (klein en groot), waarbij de druk stapsgewijs werd verhoogd in sprongen van 150 Pa. Het uiteindelijke debiet werd achteraf uit de simulatie berekend.

Resultaten na 60 seconden

Na 60 seconden bedroeg de gemiddelde luchttemperatuur in het systeem:

Kleine ventilator: 281,95 K (8,80°C)

Grote ventilator: 283,28 K (10,13°C)

Beide configuraties zorgen voor een duidelijke afkoeling ten opzichte van de instroomtemperatuur van 15°C. De kleine ventilator presteert beter en bereikt een temperatuur die 1,33°C lager ligt dan die van de grote ventilator. Dit komt overeen met de theoretische verwachting, aangezien de natteboltemperatuur van de instroom ongeveer 8°C bedraagt.

De temperatuurverdeling toont daarnaast aan dat de compartimenten die dicht bij de zeerpotwand liggen iets koeler zijn dan het bovenste compartiment. Tijdens de analyse bleek echter dat het CFD-model een ontwerpfout bevatte: tussen de compartimenten waren openingen voorzien (figuur²) waardoor lucht tussen de units kon mengen. Hierdoor werden temperatuurverschillen afgevlakt. In het uiteindelijke ontwerp zijn deze openingen verwijderd, waardoor duidelijkere temperatuurzones verwacht worden.

Resultaten luchtvochtigheid na 60 seconden

Na 60 seconden bedroeg de waterdampmassafractie:

Kleine ventilator: 0,00571 (~55% RV bij 15°C)

Grote ventilator: 0,00559 (~54% RV bij 15°C)

De kleine ventilator zorgt voor een hogere vochtopname omdat de lucht langer in contact blijft met de natte kleiwand. Hierdoor vindt meer verdamping plaats, wat ook de betere koelprestatie verklaart.

Dat de luchtvochtigheid na 60 seconden nog relatief beperkt stijgt, is normaal. Verdampingskoeling is een geleidelijk proces waarbij de vochtigheid zich langzaam opbouwt. Zowel de simulatie als de prototypetesten tonen aan dat de luchtvochtigheid bij langdurig gebruik verder blijft toenemen.

Resultaten na 60 seconden

Uit de simulatie volgt een massadebiet van 0,008383 kg/s, wat overeenkomt met een volumedebiet van ongeveer 25 m³/h. Het benodigde ventilatorvermogen bedraagt slechts 3,6 W. Bij een elektriciteitsprijs van €0,30 per kWh resulteert dit in een energiekost van ongeveer €0,78 per maand of €9,33 per jaar.

Deze resultaten tonen aan dat het werkelijke energieverbruik aanzienlijk lager ligt dan de oorspronkelijke theoretische schatting van €59,10 per jaar. Vergeleken met een klassieke koelcel met bevochtiging, die gemiddeld ongeveer €3.500 per jaar verbruikt, is het Boroud-systeem ongeveer **92% energie-efficiënter**. Dit bevestigt dat het concept niet alleen technisch werkt, maar ook een bijzonder energiezuinige oplossing biedt voor de bewaring van gewassen.

Conclusie CFD-simulatie

De CFD-simulatie in ANSYS Fluent toont aan dat het systeem theoretisch kan koelen tot ongeveer 8°C boven het natte-bol temperatuur, wat overeenkomt met de thermodynamische berekeningen (theoretisch minimum ~8°C wetbulb). Voor het vereiste ventilatordebiet volstaat een kleine computerventilator. Op basis van de simulatie zou het systeem theoretisch ~92% energiezuiniger zijn dan een klassieke koelcel. Dit resultaat is veelbelovend, maar dient met voorzichtigheid geïnterpreteerd te worden: de simulatie vertrekt van een sterk vereenvoudigd model onder ideale omstandigheden. In de praktijk treden extra weerstanden op door roosters, bochten, oppervlakteruwheid en lekverliezen, waardoor een hogere ventilatorvermogen nodig zal zijn.

Een realistische schatting van de energiebesparing ligt in de grootteorde van 50–75% ten opzichte van conventionele koeling. Definitieve validatie vereist testen met een prototype op ware grootte.

Temperatuur en vochtigheid per unit

Temperatuur

De exacte temperatuur in elke opslagunit kan niet analytisch worden bepaald zonder gedetailleerde informatie over de luchtuitwisseling tussen de windtoren en de afzonderlijke compartimenten. Hiervoor is een meer uitgebreide CFD-simulatie met compartimentspecifieke metingen nodig. Op basis van de beschikbare gegevens kunnen echter wel realistische schattingen worden gemaakt.

De theoretische ondergrens van het systeem wordt bepaald door de natteboltemperatuur van de inkomende lucht. Bij een keldertemperatuur van 15 °C en een relatieve luchtvochtigheid van 40% bedraagt deze ongeveer 8 °C. Via verdampingskoeling kan de lucht dus niet verder afkoelen dan deze temperatuur. De bovengrens wordt gevormd door de oorspronkelijke keldertemperatuur van 15°C.

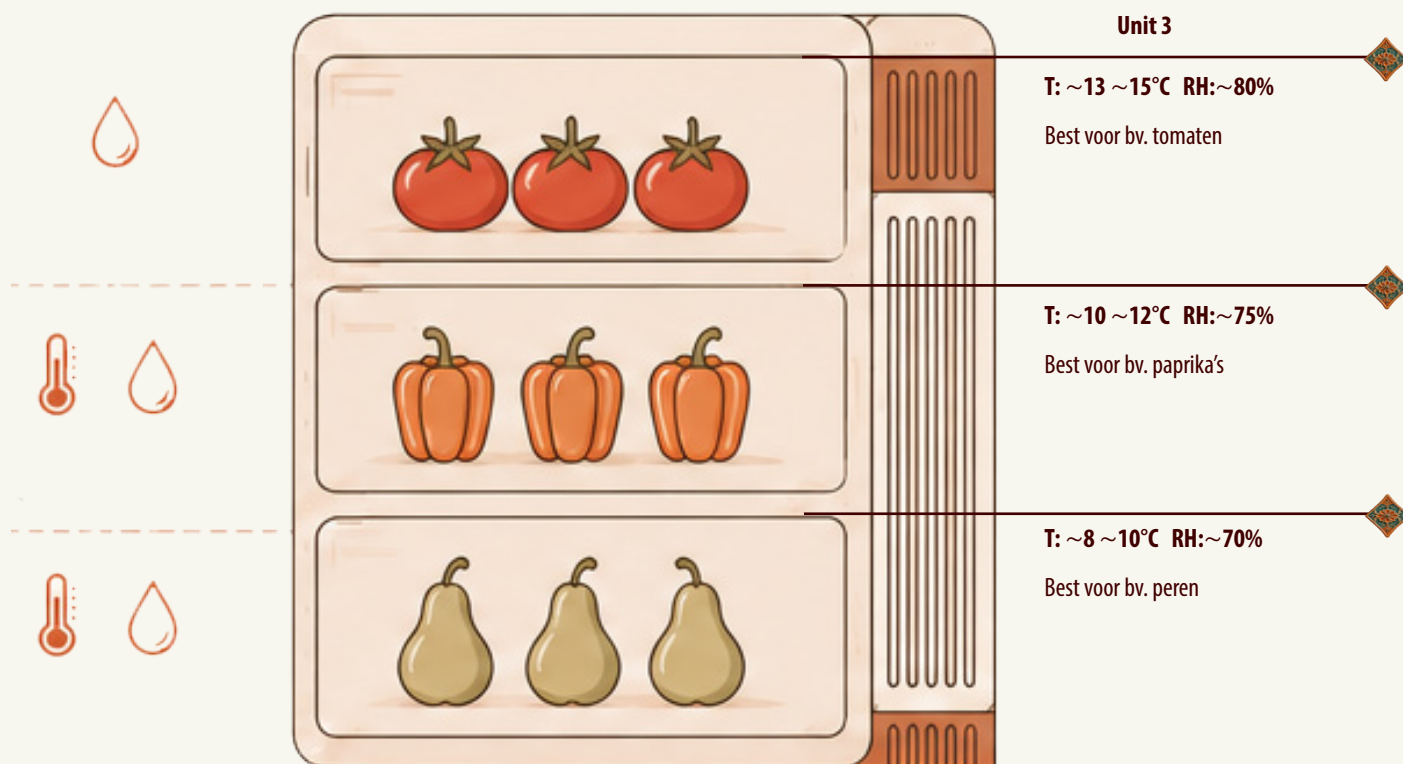
De lucht stroomt van onder naar boven langs de twee zeerpotwanden. Onderaan is de lucht het droogst, waardoor de verdamping het sterkst is en de grootste temperatuurdaling optreedt. Naarmate de lucht verder stijgt, neemt haar vochtgehalte toe en vermindert de verdampingsintensiteit. Daardoor zal de koeling in de middelste unit lager zijn dan in de onderste. De bovenste unit bevat geen zeerpotwand en ontvangt enkel reeds bevochtigde lucht via het rooster, waardoor daar de kleinste temperatuurdaling wordt verwacht.

Luchtvochtigheid

De luchtvochtigheid in het systeem wordt bepaald door de hoeveelheid water die via de twee zeerpotwanden verdampt. Op basis van de berekende verdampingssnelheid voegen de wanden samen ongeveer 43,7 g water per uur toe aan de lucht. In de onderzochte kelderruimte komt dit overeen met een vochttoename van ongeveer 3,24 g water per kilogram lucht per uur.

De luchtvochtigheid verschilt per opslagunit doordat de lucht geleidelijk meer vocht opneemt terwijl ze langs de zeerpotwanden omhoog stroomt. In de onderste unit is de lucht nog relatief droog en vindt de sterkste verdamping plaats. In de middelste unit is de lucht vochtiger geworden, terwijl de bovenste unit de meest verzadigde lucht ontvangt, aangezien deze eerst langs beide zeerpotwanden is gepasseerd voordat ze via het rooster naar buiten stroomt.

Deze vochtgradiënt maakt het mogelijk om gewassen strategisch te verdelen. Gewassen die vooral een lage temperatuur vereisen, zoals appels en rode bieten, kunnen in de onderste unit worden geplaatst. Producten die zowel koeling als een hoge luchtvochtigheid nodig hebben, zoals paprika's en wortelen, passen beter in de middelste unit. Gewassen die vooral baat hebben bij een hoge luchtvochtigheid, zoals tomaten, kunnen in de bovenste unit worden opgeslagen.



Figuur 63: Temperatuur en vochtigheid per unit

Ergonomie: kratten optillen

Het systeem werd ontworpen voor de gemiddelde Belgische vrouw als kleinste gebruiker (166 cm), zodat het voor een zo breed mogelijke groep gebruikers toegankelijk blijft (VUB Groeistudie, 2019). Voor alle ergonomische berekeningen wordt rode biet als referentiegewas gebruikt. Rode biet heeft van de onderzochte lokaal geteelde gewassen de hoogste dichtheid en resulteert daardoor in het zwaarste kratgewicht. Bij een volle eurokrat van $600 \times 400 \times 180$ mm, de grootste kratmaat die in de unit past, bedraagt het gewicht 17,5 kg.

Unit 1: onderaan (5 en 23 cm tilhoogte)

Unit 1 bevindt zich onderaan het systeem. Krat 1 wordt op slechts 5 cm hoogte geplaatst en hoeft niet getild te worden. Via het kantelprincipe wordt de krat tegen de rand van de unit geplaatst en vervolgens horizontaal naar binnen geschoven over de HDPE-glijribben. Hierdoor wordt de tilhandeling volledig vermeden. Krat 2 bevindt zich op 23 cm hoogte en heeft een maximaal aanbevolen tilgewicht van 20 kg volgens de NIOSH-methode. Bij het zwaarste referentiegewas, een volle krat rode biet van 17,5 kg, bedraagt de veiligheidsmarge 14%.

Unit 2: midden (55 en 73 cm tilhoogte)

Unit 2 is de meest ergonomische positie binnen het systeem. Beide kratten bevinden zich in of vlak bij de powerzone van 70 tot 100 cm, waar de belasting op de rug het laagst is. Krat 1 op 55 cm heeft een maximaal aanbevolen tilgewicht van 21,6 kg en een veiligheidsmarge van 23% bij een volle krat rode biet van 17,5 kg. Krat 2 op 73 cm bevindt zich volledig binnen de powerzone en heeft een maximaal aanbevolen tilgewicht van 23 kg, wat resulteert in een veiligheidsmarge van 31%. Beide kratten blijven daarmee ruim binnen de aanbevolen normen.

Unit 3: bovenaan (105 en 123 cm tilhoogte)

Unit 3 bevindt zich boven de powerzone, maar beide kratten blijven ook hier binnen de NIOSH-richtlijnen. Krat 1 op 105 cm heeft een maximaal aanbevolen tilgewicht van 21 kg en een veiligheidsmarge van 20%. Krat 2 op 123 cm is de hoogste positie in het systeem en daardoor ergonomisch het meest belastend. Toch blijft ook deze krat binnen de norm, met een maximaal aanbevolen tilgewicht van 19,5 kg en een veiligheidsmarge van 11%. Omdat unit 3 thermisch de warmste zone is, worden hier in de praktijk meestal lichtere gewassen opgeslagen dan rode biet, waardoor de werkelijke belasting lager ligt dan in deze referentieberekening.

Figuur 64: Ergonomie boer



Detail



BORoud

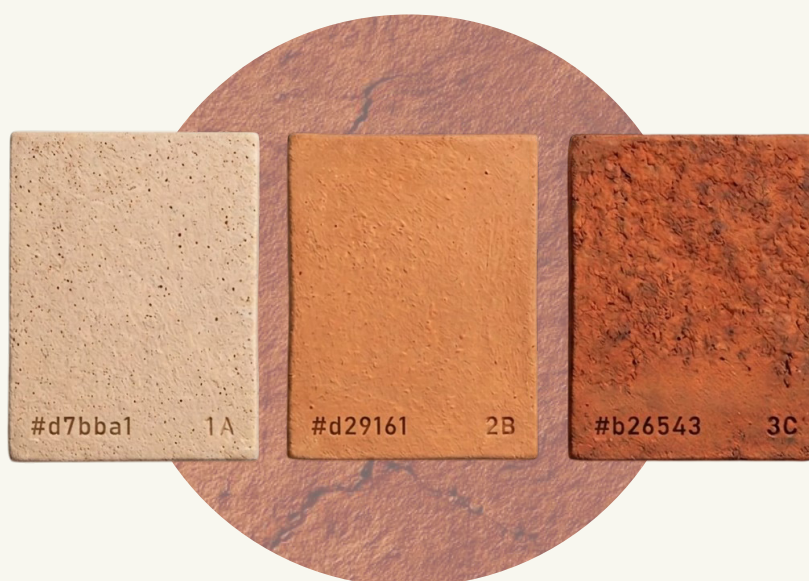
Naamgeving

Bij het zoeken naar een naam werd vertrokken vanuit een persoonlijke verbondenheid met het Mesopotamisch erfgoed. De naam moest meer zijn dan enkel een productnaam. Ze moest ook het verhaal en de oorsprong van het project weerspiegelen.

De naam Boroud heeft daarom een dubbele betekenis. Enerzijds is hij afgeleid van het Arabische en Perzische woord *bārūd*, wat “koelte” betekent. Daarmee verwijst de naam rechtstreeks naar de traditionele koeltechnieken uit het Midden Oosten en Noord Afrika waarop het systeem gebaseerd is.

Anderzijds klinkt Boroud in het Nederlands als een combinatie van “boer” en “oud”. Daarmee verwijst de naam tegelijk naar de doelgroep van het project, namelijk de boer, en naar de oude technieken die als inspiratiebron dienden. Zo verbindt de naam op een natuurlijke manier Vlaamse landbouw met de kennis van oude beschavingen.

Boroud is een fantasienaam: uniek, herkenbaar en inhoudelijk betekenisvol. Uit merkenonderzoek via BOIP, EUIPO en WIPO bleek bovendien dat de naam nog vrij beschikbaar is binnen de relevante klassen op Benelux, Europees en internationaal niveau.



Typografie en kleur

De visuele identiteit van Boroud is bewust aards, warm en eenvoudig gehouden. Het kleurenpalet bestaat uit drie terracotta tinten die verwijzen naar de materialen van het systeem zelf: gebakken klei, droge aarde en rood zand.

De kleur #d7bba1 wordt gebruikt als rustige basiskleur, #d29161 als warme accentkleur en #b26543 als primaire merkkleur met meer diepte en contrast. Samen geven deze kleuren het merk een natuurlijk en eerlijk karakter dat aansluit bij de waarden van duurzaamheid, eenvoud en toegankelijkheid.

Ook het lettertype sluit daarbij aan. Er werd gekozen voor een vloeiende en organische typografie die warm en toegankelijk aanvoelt, zonder te technisch of industrieel te worden. Het product ondersteunt de boer bij het bewaren van zijn oogst en moet daarom rust, eenvoud en vertrouwen uitstralen in plaats van opdringerig aanwezig te zijn.

Logo

Ook voor het logo werden verschillende richtingen onderzocht. Uiteindelijk werd gekozen voor een flexibel logo dat zowel als volledig woordmerk als los beeldmerk gebruikt kan worden.

Het logo bestaat uit een handgeschreven typografisch woordmerk met een organische en vloeiende vormgeving. De ronde letters versterken het warme en traditionele karakter van het project.

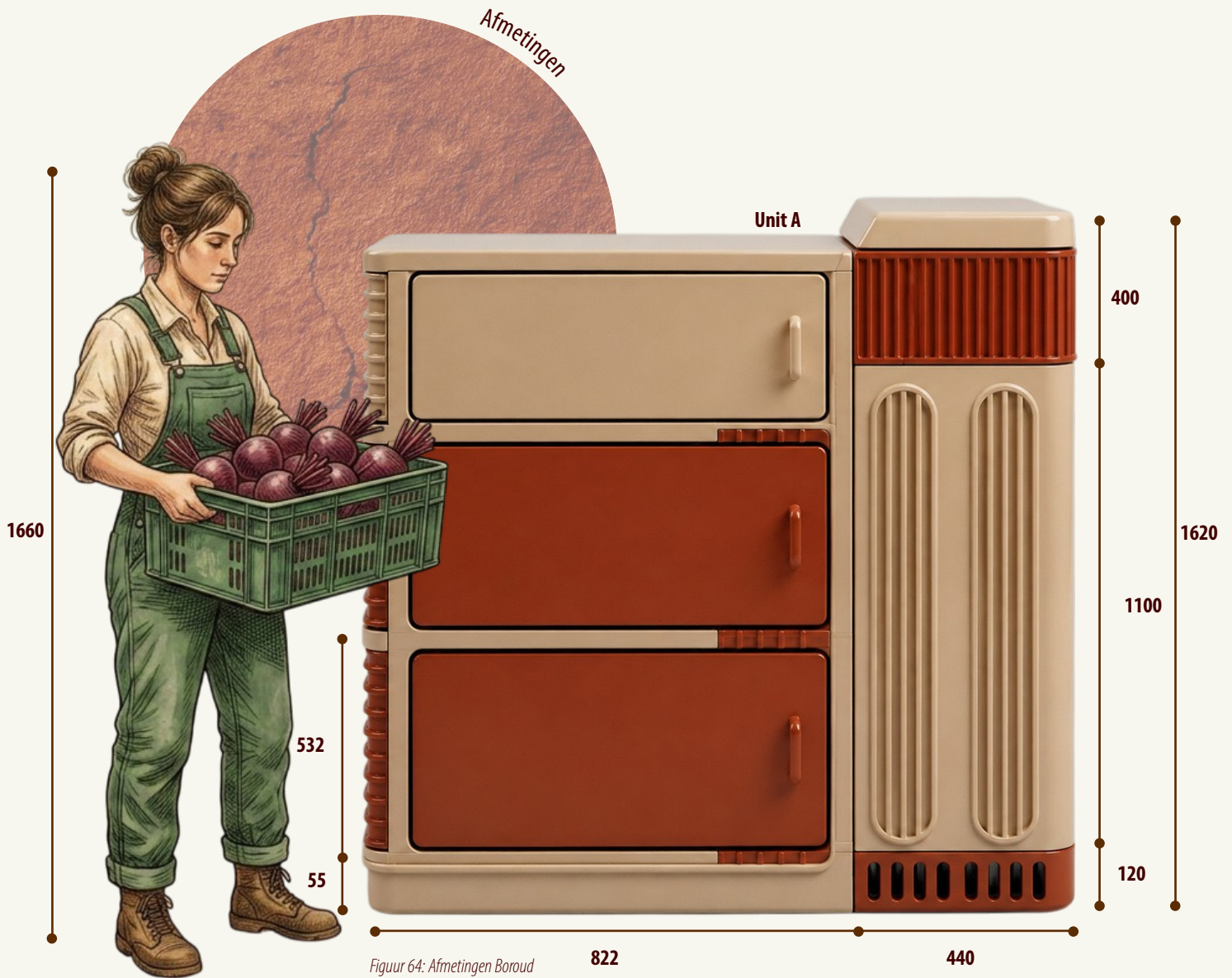
Binnen het logo werd ook subtiel de Arabische schrijfwijze van de naam verwerkt. Daardoor wordt de culturele achtergrond van Boroud zichtbaar zonder te dominant aanwezig te zijn.

De vormtaal van het logo sluit bewust aan bij het product zelf. De zachte en afgeronde lijnen verwijzen naar de organische vormen en natuurlijke materialen van het systeem. Hierdoor ontstaat een duidelijke visuele samenhang tussen het product en de merkidentiteit.

De volledige identiteit van Boroud blijft bewust minimalistisch, warm en aards. Scherpe vormen, harde contrasten en technische symbolen werden vermeden. Het logo moet niet aanvoelen als een industrieel toestel, maar als een vertrouwd hulpmiddel dat voortbouwt op eeuwenoude kennis, vertaald naar de noden van de boer van vandaag.



Afmetingen en details van Boroud



Figuur 65: Boroud perspectief

Afmetingen

In figuur 65 wordt een boerin met een lengte van 1660 mm weergegeven. Dit komt overeen met de gemiddelde lengte van een Belgische vrouw en werd gebruikt als referentie om de schaal en proporties van het systeem visueel weer te geven. Hierdoor wordt duidelijk hoe groot het systeem is ten opzichte van de gebruiker.

Wandopening

Figuur 66 toont een vereenvoudigd model zonder de zeerpotwand en waterreservoirs. Hierdoor wordt de opening tussen de opslagunit en de windtoren duidelijk zichtbaar. Via deze opening kan de gekoelde lucht de unit bereiken. Voor deze opening wordt later de zeerpotwand geplaatst, die door verdampingskoeling koude afgeeft aan de opslagruimte.



Figuur 66: Wandopening



Ventilatieopening & Rubberen kader

Ventilatieopening

Op advies van de CFD-expert werd bovenaan elke unit een ventilatieopening voorzien. Zo kan warme en vochtige lucht, die door de gewassen wordt geproduceerd, gemakkelijker ontsnappen.

Rubberen kader

Een rubberen kader tussen de toren en de unit zorgt voor een luchtdichte aansluiting en voorkomt ongewenste luchtlekken.



Male onderkant

Male onderkant

Een ingedrukte rand rondom de onderzijde van de unit past precies over de uitstekende rand van de bovenliggende unit. Hierdoor worden de units automatisch gepositioneerd en kunnen ze niet verschuiven wanneer ze op elkaar gestapeld worden.

Female bovenkant

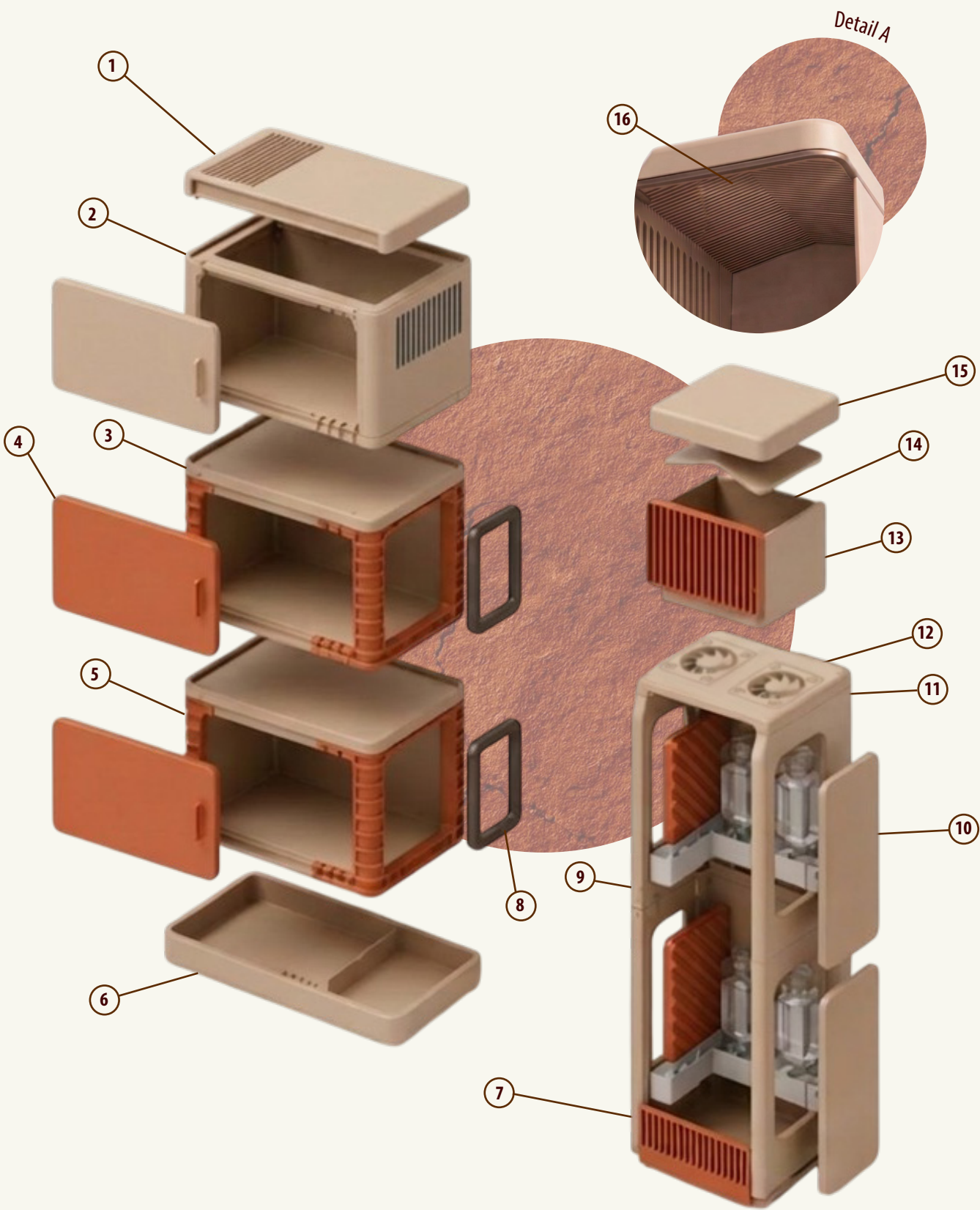


Female bovenkant

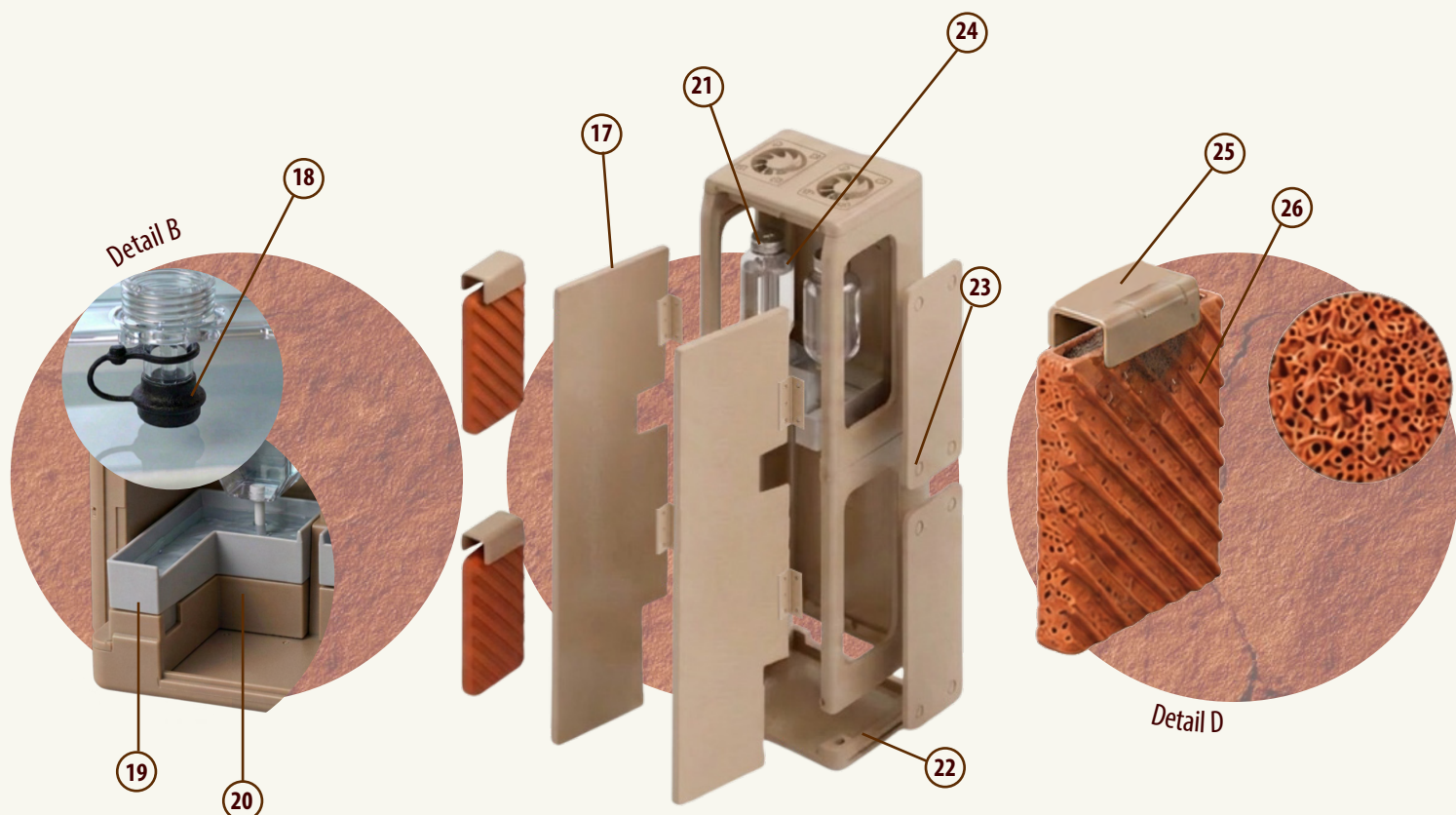
Female bovenkant

Een uitstekende rand rondom de bovenzijde zorgt voor stabiliteit en centrering van de bovenliggende unit. Hierdoor sluiten de units correct op elkaar aan en blijft de stapelconstructie stevig staan.

Exploded view



Figuur 67: Exploded view



	Nr.	Onderdeel	Aantal	Materiaal	Productietechniek
Units:	01	Deksel met rooster	1×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE)
	02	Unit box met rooster	1×	HDPE 3mm + PUR 35mm	Spuitgieten (HDPE) + PUR schuimgieten
	03	Deksel andere unit (female bovenkant)	2×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE)
	04	Deur	3×	HDPE 3mm + PUR 35mm	Spuitgieten (HDPE) + PUR schuimgieten
	05	Unit box (male bottom)	2×	HDPE 3mm + PUR 35mm	Spuitgieten (HDPE) + PUR schuimgieten
	06	Steunplaat	1×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE)
	08	Rubber afdichting	3×	EPDM rubber	

	Nr.	Onderdeel	Aantal	Materiaal	Productietechniek
Zeerpot & watertoevoer:	18	Dop vacuum onderkant	4×	Kunststof	Aankooponderdeel
	19	Waterbak	4×	HDPE	Spuitgieten (HDPE)
	20	Steun waterbak	4×	HDPE	Spuitgieten (HDPE)
	21	Bovendop vacuum	1×	Kunststof	Aankooponderdeel
	24	Waterreservoir 3,5L	4×	HDPE transparant	Aankooponderdeel
	25	Steun U-vorm zeerpot	4×	HDPE	Spuitgieten (HDPE)
	26	Zeerpot	4×	Roodbakkende chamotteklei	Slipcasting in gipsmatrijs

	Nr.	Onderdeel	Aantal	Materiaal	Productietechniek
Windtoren:	07	Rooster luchtinlaat	1×	HDPE	Spuitgieten (HDPE)
	09	Zijplaat windtoren	2×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE) + thermisch lassen
	10	Uitneembaar paneel	4×	HDPE 3mm	Thermovormen + CNC-boren
	11	Bovenplaat windtoren	1×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE)
	12	Ventilator	1×	-	Aankooponderdeel
	13	Rooster decoratief / opening	1×	HDPE	Spuitgieten (HDPE)
	14	Unit box boven windtoren	1×	HDPE 3mm + PUR 35mm	Spuitgieten (HDPE) + PUR schuimgieten
	15	Deksel windtoren	1×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE)
	16	Dakribben condensatie	1×	HDPE	Spuitgieten (HDPE)
	17	Tussenplaat windtoren	2×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE) + thermisch lassen
	22	Onderplaat windtoren	1×	HDPE 3mm	Spuitgieten (HDPE)
	23	Schroeven paneel	16×	RVS A2	Aankooponderdeel

HDPE panelen: CNC frezen en thermisch lassen

Voor de wandpanelen, deuren en tussenschotten wordt gebruikgemaakt van HDPE platen van 3 mm dik. Deze worden via CNC frezen nauwkeurig op maat gesneden, inclusief de groeven en bevestigingspunten.

De onderdelen worden daarna thermisch aan elkaar gelast. Hierbij worden de HDPE oppervlakken lokaal verwarmd en samengedrukt zodat een stevige verbinding ontstaat zonder lijm of extra bevestigingen. HDPE is hiervoor geschikt door de lage smelttemperatuur en goede lasbaarheid.

PUR sandwichwand: sandwichlaminering

De geïsoleerde wanden bestaan uit twee HDPE platen met daartussen een PUR isolatiekern.

Tijdens de productie wordt vloeibaar PUR tussen beide platen geïnjecteerd. Het schuim zet uit, vult de volledige ruimte op en hardt uit tot een stijve sandwichwand met een isolatiewaarde van $\lambda = 0,023 \text{ W/mK}$.

Deze techniek wordt ook gebruikt in koelwagens en industriële koelinstallaties en is goed geschikt voor serieproductie.

Zeerpotwand: slipcasting en tunneloven

De zeerpotwand wordt geproduceerd via slipcasting in een gipsmatrijs. Het gips neemt water op uit de vloeibare klei waardoor de kleiwand uithardt tegen de mal en daarna gemakkelijk loskomt.

Na het gieten droogt het paneel 24 tot 48 uur op kamertemperatuur om scheuren te vermijden. Vervolgens wordt het gebakken in een tunneloven tussen 1000 en 1200°C. Hierdoor blijven de porositeit en capillaire eigenschappen consistent over grote productieseries.

In een latere fase kan keramisch 3D printen interessant zijn voor prototypes en kleine productieseries, maar voor grotere oplages blijft slipcasting voorlopig de meest kostenefficiënte oplossing.

Windtoren zijpanelen — thermovormen

De verwijderbare zijpanelen van de windtoren worden geproduceerd via thermovormen. Hierbij wordt een HDPE plaat verwarmd en via vacuüm over een mal getrokken.

Deze techniek is goedkoper dan spuitgieten voor grote vlakke panelen en laat toch een nauwkeurige productie toe. Na het vormen worden de bevestigingspunten nog CNC geboord voor extra maatnauwkeurigheid.



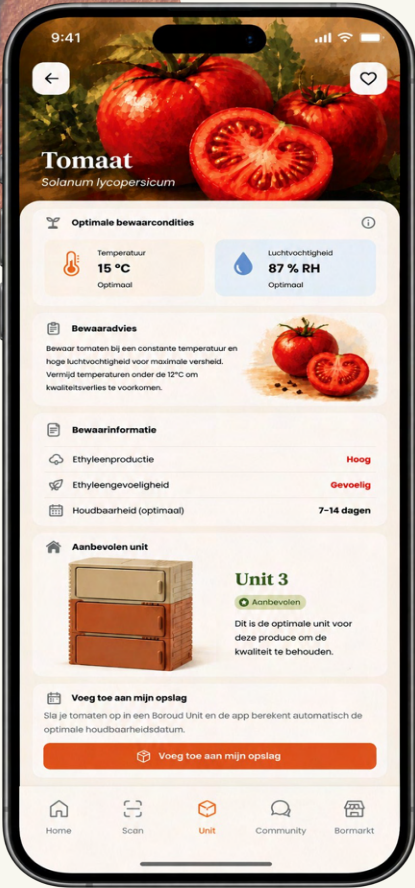
Figuur 68: Flyer Boroud

Interface flow

Scan je gewas

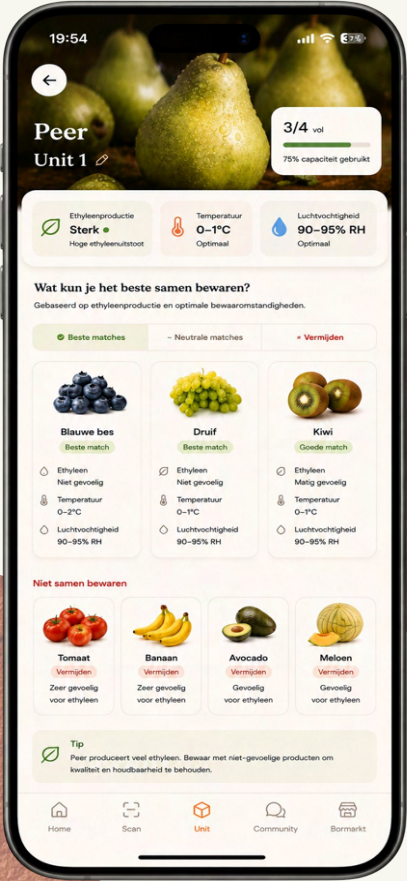


Krijg meer info over je gewas



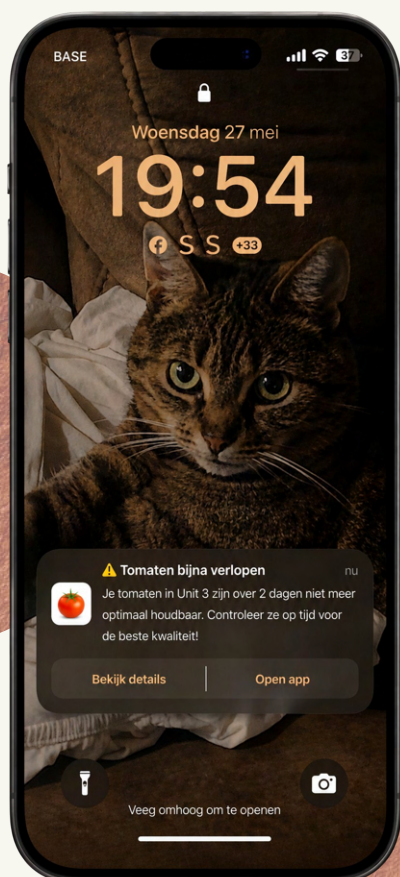
Zie in welke unit je gewas moet bewaren

Zie welke gewas compatibel is om samen te bewaren en welke je moet vermijden



Vind je match

Krijg een notificatie voordat je gewas bederft

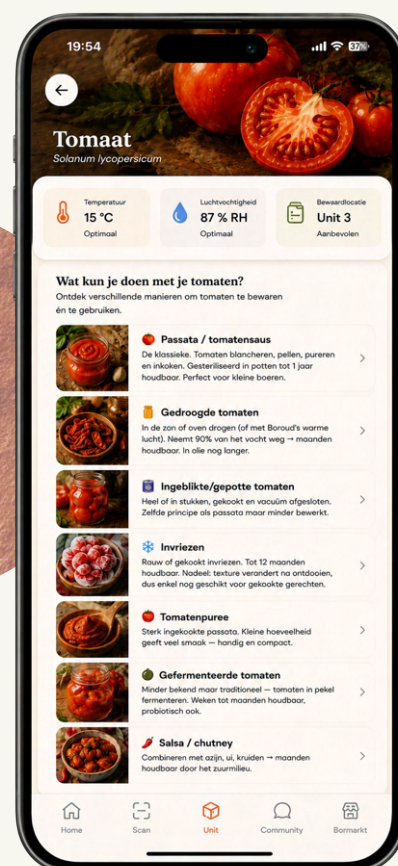


Meer info om je gewassen te bewaren



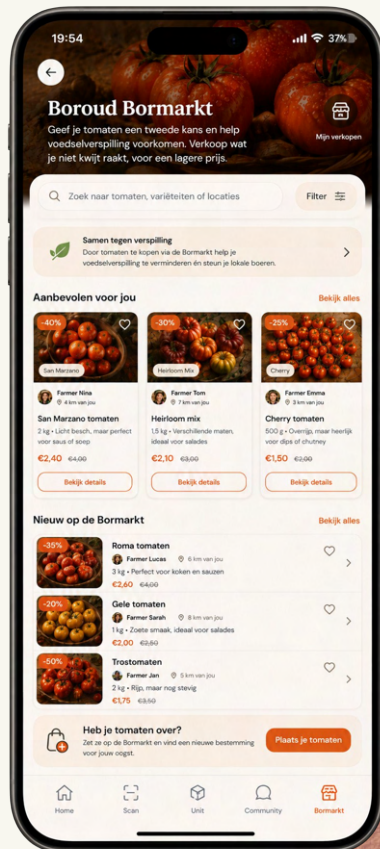
Bekijk je opslag

Ontdek verschillende manieren om je gewassen te bewaren en te gebruiken



Figuur 69: Interface flow

Je kan in je opslag al je gewassen bekijken en de levensduur



Verkoop wat je niet kwijtraakt,
voor een lagere prijs aan lokale
verkopers en restaurants.

Community

Bekijk hoeveel jouw unit koelt
en wanneer je water terug moet
bijvullen



Onderhoud

Figuur 70: Interface flow 2

De Boroud app

De Boroud app is de digitale uitbreiding van het Boroud systeem en helpt gebruikers om hun oogst beter te bewaren en voedselverlies te verminderen.

Gebruikers kunnen gewassen opzoeken via een scanfunctie of via de gewassenbibliotheek. De app toont meteen de ideale bewaartemperatuur, luchtvochtigheid en houdbaarheid van het product. Daarnaast controleert de app ook welke gewassen beter niet samen opgeslagen worden door ethyleenproductie.

Wanneer een gewas opgeslagen wordt, kan het toegevoegd worden aan een persoonlijke opslagtracker. De gebruiker geeft de hoeveelheid en opslagdatum in, waarna de app automatisch de houdbaarheid opvolgt. Via meldingen laat de app weten wanneer producten best verwerkt, ingevroren, gedroogd of verkocht worden om verspilling te vermijden.

De app houdt ook bij hoeveel voedselverlies ongeveer vermeden werd. Wanneer gebruikers aangeven dat producten verkocht, verwerkt of opgebruikt werden in plaats van weggegooid, berekent de app hoeveel kilogram oogst gered werd. Daarnaast maakt de app ook een schatting van hoeveel producten langer bewaard konden worden dankzij het Boroud systeem tegenover een gewone niet gekoelde opslagruimte.

Voor overschotten bevat de app ook de Bormarkt, een lokale marktplaats waar producten rechtstreeks verkocht kunnen worden aan buurtbewoners of restaurants. Het systeem werkt gelijkaardig aan Too Good To Go, maar dan rechtstreeks van boer naar consument.

Daarnaast bevat de app een communitygedeelte waar gebruikers ervaringen delen en vragen kunnen stellen over bewaren, gewassen en voedselverwerking. De Boroud Assistant ondersteunt gebruikers hierbij met AI gebaseerde hulp gebaseerd op wetenschappelijke postharvest kennis.

Niet alleen voor boeren, maar ook voor particulieren

De Boroud app is niet uitsluitend ontwikkeld voor professionele boeren. Ook particulieren met een kleine Boroud unit thuis kunnen de app volledig gebruiken.

Mensen die thuis groenten of fruit bewaren, een moestuin hebben of lokaal voedsel inkopen, kunnen op dezelfde manier hun producten registreren en de houdbaarheid opvolgen. De app geeft meldingen wanneer producten best verwerkt of opgebruikt worden en helpt zo ook thuis voedselverspilling verminderen.

Particulieren hebben toegang tot dezelfde functies zoals de gewassenbibliotheek, compatibiliteitschecker, Bormarkt en traditionele bewaar technieken. Enkel technische gegevens en onderhoudsinformatie van grotere professionele installaties worden niet weergegeven.

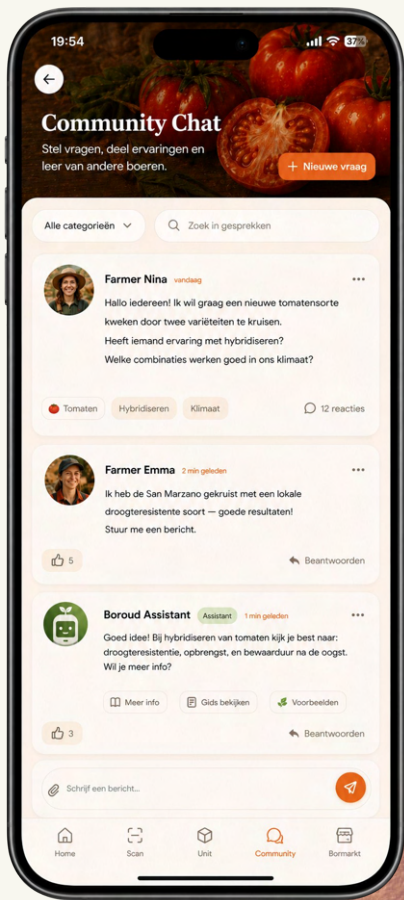
Daardoor wordt Boroud niet alleen een hulpmiddel voor landbouwers, maar ook voor gezinnen, hobbytuiniers en mensen die bewuster willen omgaan met voedselbewaring.

Traditionele bewaar technieken

Een extra onderdeel van de app focust op traditionele bewaar technieken uit verschillende culturen. De app toont natuurlijke methodes om voedsel langer te bewaren zonder elektriciteit, zoals appels bewaren in stro, knoflook ophangen in droge ruimtes of citrusvruchten bewaren in koele aarde.

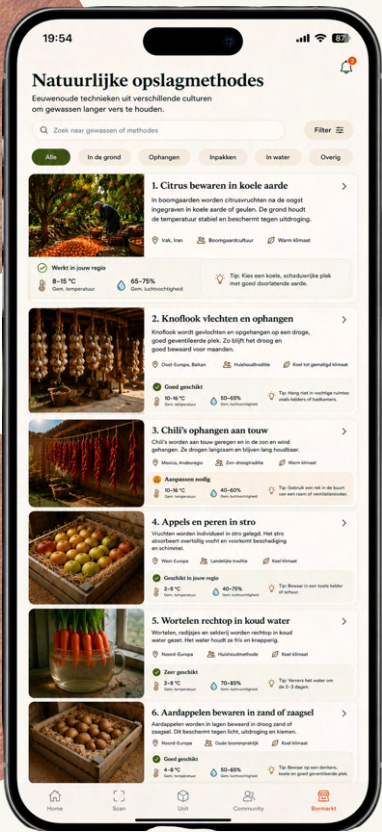
Bij elke techniek wordt uitgelegd in welk klimaat ze werkt, welke temperatuur en luchtvochtigheid ideaal zijn en hoe de methode toegepast wordt. Zo combineert de Boroud app moderne technologie met traditionele landbouwkennis en maakt ze deze toegankelijk voor zowel boeren als particulieren.

Stel vragen, deel ervaring en leer van andere boeren



Community chat

Figuur 70: Interface flow 3



Natuurlijke methodes

An abstract graphic design featuring a large, textured orange circle in the upper right corner. Below it, a spiral staircase with orange steps and railings curves upwards. The word "Productvoorstelling" is written in a bold, orange, sans-serif font, slanted upwards, and is underlined with a thick, textured orange line. The background is a light, textured orange.

Productvoorstelling



Energiezuinig dankzij natuurlijke koeling

Gebaseerd op eeuwenoude **verdampingskoeling** uit Perzische, Egyptische en Mesopotamische culturen.

Tot **52% efficiënter** per liter opslagcapaciteit dan een klassieke koelcel met bevochtiging.

Zonder koelgassen of complexe installaties zorgt een kleine ventilator voor de nodige luchtstroming en **lage energiekost**.



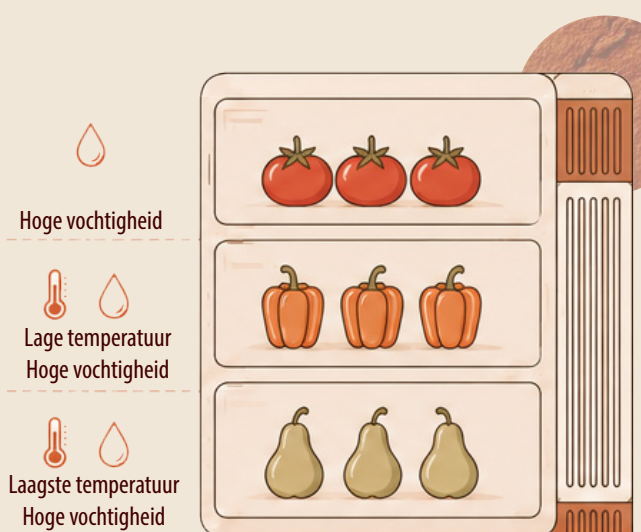
Figuur 72: Toegevoegde waarde 1

Afgestemd op elk gewas

Elke unit is afgestemd op de **optimale temperatuur en luchtvochtigheid** die jouw gewas nodig heeft.

Drie verschillende zones binnen één unit.

Eenvoudig uit te breiden naargelang de groei van het bedrijf of het seizoen.



Figuur 73: Toegevoegde waarde 2

Minder voedselverlies dankzij slimme monitoring

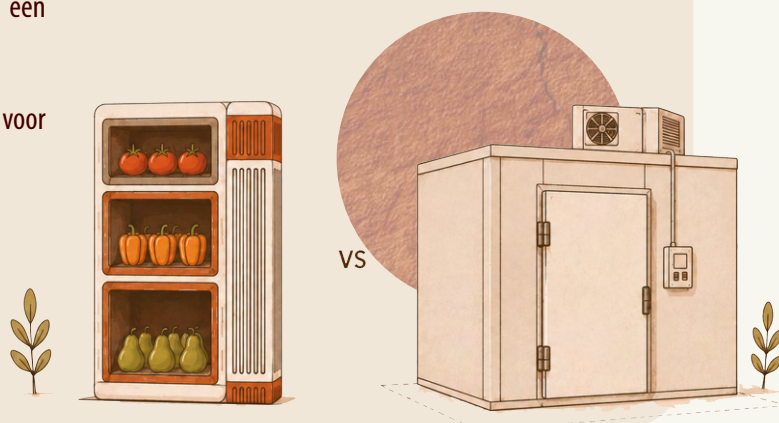
- ◆ Realtime inzicht via de Boroud-app in temperatuur, luchtvochtigheid en waterniveau per unit.
- ◆ Meldingen wanneer ingrijpen nodig is helpt **voedselverlies** voorkomen.
- ◆ Via de **Bormarkt** kunnen gewassen die bijna hun optimale bewaartermijn bereiken lokaal aangeboden worden tegen een lagere prijs.



Figuur 73: Toegevoegde waarde 3

Lage investeringskost en eenvoudig te plaatsen

- ◆ Geen aparte gekoelde ruimte of zware infrastructuur nodig.
- ◆ Dankzij de **modulaire opbouw** kun je verschillende units naast elkaar plaatsen, altijd verbonden met één toren.
- ◆ Toegankelijke naooogstkoeling voor kleine landbouwbedrijven.



Figuur 74: Toegevoegde waarde 4

BORoud

USER JOURNEY

Stap 1



OOGSTEN EN INVOEREN

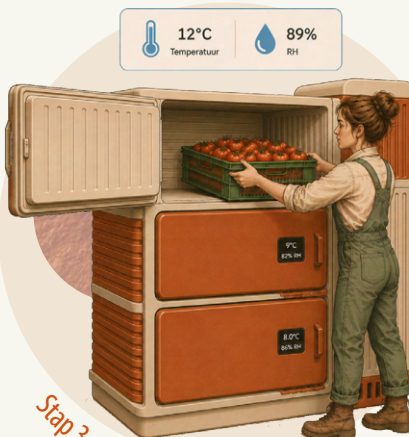
De boer oogst haar gewas en voert ze in via de Boroud-app

APP ANALYSEERT GEWAS

De boer oogst haar gewas en voert ze in via de Boroud-app



Stap 2



Stap 3

OPSLAAN IN BOROUD-UNIT

De boer plaatst de gewassen in het aanbevolen compartiment

SLIMME MONITORING EN MELDING

Boroud berekent wanneer de gewassen zijn opgeslagen en waarschuwt wanneer de houdbaarheid bijna bereikt

Tomaten bijna verlopen
Je tomaten in Unit 3 zijn over 2 dagen niet meer optimaal houdbaar. Controleer ze op tijd voor de beste kwaliteit!

Tomaten toegevoegd
Je tomaten zijn nu zichtbaar op de Boroud-markt.

[Naar de Boroud-markt](#)



Stap 4

BOROUD MARKT EN VERKOOP

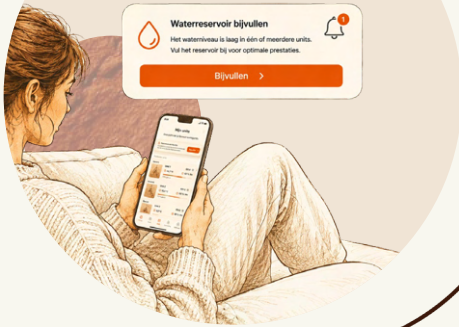
De boer biedt haar niet verkochte gewassen op de Bormarkt zodat lokale kopers het voor een lagere prijs kunnen kopen

Stap 5



Figuur 75: User journey

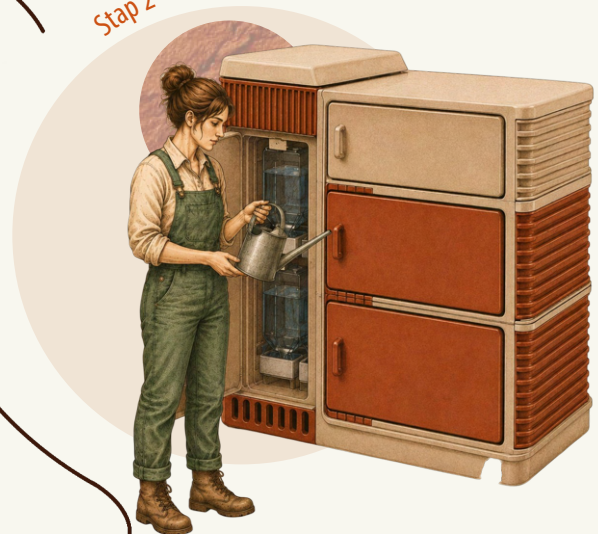
Stap 1



MELDING: WATER NIVEAU TE LAAG

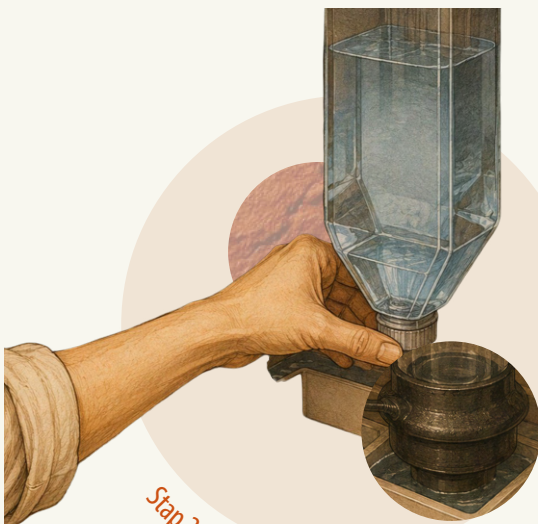
Boroud stuurt een melding wanneer het waterniveau te laag is. Zo weet je precies wanneer het tijd is om bij te vullen

Stap 2



WATER BIJVULLEN

Vul het reservoir eenvoudig bij met water via de boven kant. Gebruik een gieter voor optimaal gebruiksgemak



Stap 3

EERST ONDERSTE DOP DICHTDRAAIEN

Voordat je water bijvult draai eerst de onderste dop goed vast zodat de vacuümreservoir werkt en het water niet zomaar door sijpelt

BOVENDEKSEL OPENEN EN GIETEN

Open het deksel aan de bovenkant en giet water in het reservoir tot de gewenste niveau

Stap 4



Figuur 76: User journey -onderhoud



Unit A in kelder



Unit A binnenkant



Unit B



Unit A in schuur

Terugkoppeling

Functionele specificaties

- Het systeem moet verschillende gewassen gelijktijdig kunnen bewaren.
- Het systeem moet gewasspecifieke bewaaromstandigheden mogelijk maken.
- Het systeem moet temperatuur en luchtvochtigheid per opslagzone kunnen monitoren.
- Het systeem moet de houdbaarheid van gewassen verlengen.
- Het systeem moet voedselverlies na de oogst verminderen.
- Het systeem moet modulair uitbreidbaar zijn.
- Het systeem moet eenvoudig te configureren zijn voor verschillende gewassen.



Technologische specificaties

- Het systeem moet gebruikmaken van passieve verdampingskoeling als basisprincipe.
- Het systeem maakt gebruik van een actieve luchtstroom om de natuurlijke verdampingsprocessen te ondersteunen en de koelprestatie te verhogen.
- Het systeem moet temperatuur- en vochtsensoren bevatten.
- Het systeem moet een digitaal monitoringsplatform ondersteunen.
- Het systeem moet energiezuiniger zijn dan een klassieke koelcel met bevochtiging.
- Het systeem moet gebruikmaken van traditionele koelprincipes in een moderne toepassing.





Economische specificaties

- Het systeem moet betaalbaar zijn voor kleinschalige boeren. 
- Het systeem moet lagere operationele kosten hebben dan een klassieke koelcel. 
- Het systeem moet zonder grote infrastructuurwerken geplaatst kunnen worden. 
- Het systeem moet schaalbaar zijn naargelang de behoeften van de boer. 
- De economische haalbaarheid moet via een fysiek prototype worden gevalideerd. 

De economische en energetische prestaties zijn gebaseerd op theoretische berekeningen, CFD simulaties, literatuuronderzoek en kleinschalige prototypes. Voor een volledige validatie is een prototype op ware grootte nodig. Dankzij de beurs van de Stichting Future Generations kan deze volgende stap worden gerealiseerd. De ontwikkeling en testing van dit prototype vallen buiten de scope van deze masterthesis.



Duurzaamheidsspecificaties

- Het systeem moet het energieverbruik van opslag beperken. 
- Het systeem moet voedselverlies verminderen. 
- Het systeem moet water efficiënt gebruiken. 
- Het systeem moet gebruikmaken van natuurlijke koelprincipes. 
- Het systeem moet bijdragen aan een duurzamere voedselketen. 



Gebruiksvriendelijkheid

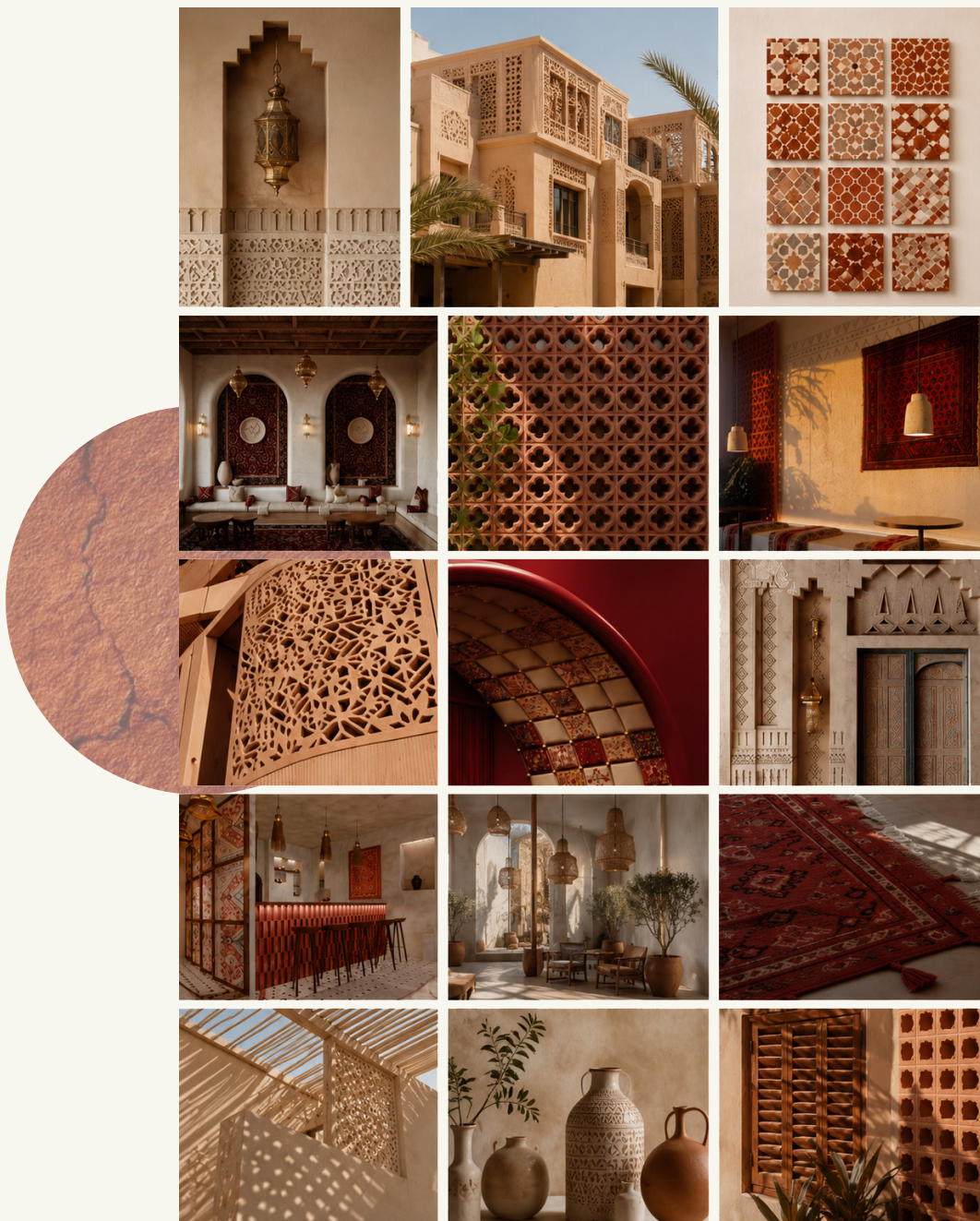
- Het systeem moet eenvoudig te gebruiken zijn. 
- Het systeem moet duidelijke feedback geven aan de gebruiker. 
- Het systeem moet zowel met als zonder smartphone bruikbaar zijn. 
- Het systeem moet flexibel inzetbaar zijn in verschillende landbouwsituaties. 
- Het systeem moet onderhoudsvriendelijk zijn. 

Look and feel

Gedurende het hele proces van deze masterthesis lag de focus voornamelijk op het ontwikkelen en optimaliseren van een functioneel en efficiënt systeem. Het doel was om traditionele koeltechnieken te combineren met moderne technologie en zo een duurzaam en energie-efficiënt concept te ontwikkelen.

Aangezien deze thesis draait rond het integreren van traditionele technieken in moderne technologie, wordt er ook gekeken naar de esthetische aspecten van het product. Het doel is niet alleen om de traditionele technieken te integreren, maar ook om bepaalde visuele kenmerken van dit erfgoed mee te nemen in het ontwerp. Daarom werd inspiratie gehaald uit Arabische en Perzische architectuur, met kenmerken zoals geometrische patronen, boogvormen, decoratieve schermen en warme aardetinten. Deze elementen werden gecombineerd met een minimalistische en hedendaagse vormgeving, waardoor een rustige en tijdloze uitstraling ontstaat.

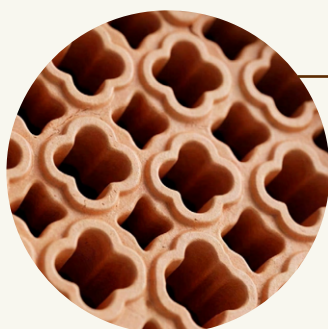
Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de produceerbaarheid van het ontwerp en mag de toevoeging van deze esthetische elementen de essentie van de thesis niet tegenspreken. De focus blijft namelijk liggen op het ontwikkelen van een functioneel, duurzaam en energie-efficiënt koelsysteem gebaseerd op traditionele technieken.



Figuur 78: Look and feel



Figuur 79: Boroud



Figuur 80: Mashrabiya

Mashrabiya

Een mashrabiya is een geperforeerd scherm dat traditioneel in Arabische landen wordt gebruikt om schaduw te creëren, luchtcirculatie te bevorderen en de binnentemperatuur te verlagen.

Hierbij moet wel rekening gehouden worden met de produceerbaarheid van het ontwerp en mag de toevoeging van deze esthetische elementen de essentie van de thesis niet tegenspreken. De focus blijft namelijk liggen op het ontwikkelen van een functioneel, duurzaam en energie-efficiënt koelsysteem gebaseerd op traditionele technieken.



Hier eindigt mijn masterthesis, maar zeker niet het verhaal van Boroud.

Tijdens dit academiejaar groeide Boroud van een eerste idee uit tot een volledig uitgewerkt concept. Via literatuuronderzoek, experteninterviews, bedrijfsbezoeken, CFD analyses, materiaalstudies en de ontwikkeling van een businessmodel werd stap voor stap onderzocht hoe een energiezuinig bewaarsysteem voor kleinschalige biologische boeren eruit kan zien. Opvallend was dat experts uit verschillende disciplines, van ingenieurs en landbouwspecialisten tot ontwerpers, telkens opnieuw het potentieel van het concept benadrukten. Daardoor voelt het niet als een project dat hier moet stoppen, maar als een project dat klaar is voor de volgende stap.

Die volgende stap is het bouwen van een fysiek prototype. Dankzij de beurs van €3.900 van de Stichting Future Generations kan een prototype op ware grootte worden gerealiseerd. De energieberekeningen, opgesteld met ondersteuning van een HVAC expert en aangevuld met CFD analyses, geven veelbelovende resultaten. Toch kan de werkelijke efficiëntie pas worden bevestigd wanneer het systeem onder reële omstandigheden wordt getest.

Om het ontwerp verder te optimaliseren, wordt momenteel gezocht naar een parttime mechanisch ingenieur die kan ondersteunen bij de verdere aerodynamische ontwikkeling van het systeem. De eerste gesprekken lopen reeds.

Indien het prototype succesvol blijkt, volgt in december 2026 een tentoonstelling van de Stichting Future Generations, waar Boroud aan een breder publiek kan worden voorgesteld. Dit vormt een belangrijke opportuniteit om contacten te leggen met de incubator die reeds interesse heeft getoond en om gesprekken op te starten met mogelijke investeerders voor de verdere ontwikkeling en commercialisering van het systeem.

Daarnaast zou een samenwerking met een biologische boer in Vlaanderen een belangrijke volgende stap zijn. Een praktijktest op een echte boerderij zou niet alleen waardevolle inzichten opleveren, maar ook aantonen welke impact Boroud kan hebben in de dagelijkse werking van een landbouwbedrijf. Indien het systeem zijn meerwaarde bewijst, zou die boer mogelijk de eerste gebruiker van Boroud kunnen worden.

De richting is duidelijk. De fundamenten zijn gelegd. Nu begint het echte werk.

Maar eerst: een welverdiende vakantie!!!!

What's Next?



Persoonlijke Reflectie

Terugkijkend op het volledige proces van deze masterthesis besef ik hoeveel ik niet alleen als ontwerper, maar ook als persoon ben gegroeid. In het begin had ik een heel ander beeld van wat dit project zou worden. Omdat ik werkte met traditionele koeltechnieken en passieve principes, dacht ik dat mijn eindproduct weinig technologie zou bevatten. Als ik daar nu op terugkijk, moet ik daar eerlijk gezegd om lachen.

Technologie was nooit mijn sterkste punt. Toch heeft deze thesis mij uitgedaagd om buiten mijn comfortzone te stappen. Ik heb veel bijgeleerd over onderwerpen waar ik voordien nauwelijks kennis van had, zoals flow simulations, thermische berekeningen en de onderliggende formules die nodig zijn om een systeem te analyseren en te optimaliseren. Dat leerproces was soms confronterend, maar tegelijkertijd enorm verrijkend.

De begeleiding van verschillende experts heeft hierin een belangrijke rol gespeeld. Ik herinner me nog goed hoe een HVAC-expert reageerde toen ik hem een vroege versie van mijn systeem toonde. Zijn eerste reactie was: "Amai, jij hebt lef om dit te laten zien." Ik moest daar vooral om lachen, want achteraf gezien ontbraken inderdaad nog heel wat berekeningen en onderbouwingen. Toch was dat een belangrijk moment. Dankzij zijn feedback begon ik beter te begrijpen hoe koeling werkt en hoeveel er al berekend en gevalideerd kan worden voordat men daadwerkelijk begint met prototyping.

Doorheen het project sprak ik met verschillende experts, elk met hun eigen visie en aanbevelingen. In het begin probeerde ik zoveel mogelijk van hun advies te verwerken. Ik wilde iedereen tevreden stellen en nam bijna elke suggestie mee. Pas later besepte ik dat dit niet altijd mogelijk is. Uiteindelijk is dit mijn masterthesis en moet ik als ontwerper zelf keuzes maken. Door voortdurend anderen te willen pleasen, verloor ik soms mijn eigen identiteit als designer uit het oog.

Tegen het einde van het proces heb ik bewust geprobeerd die identiteit terug te vinden. Ik heb keuzes gemaakt waar ik zelf achter sta en een product ontwikkeld waar ik oprecht trots op ben. Het eindresultaat is een project waar ik met veel voldoening op terugkijk en dat voor mij een mooie weerspiegeling vormt van de groei die ik tijdens dit traject heb doorgemaakt.

Als er één les is die ik uit deze periode meeneem, dan is het dat lef een van de belangrijkste eigenschappen is die je kunt hebben. Durven tonen wat nog niet perfect is, durven vragen stellen, durven fouten maken en durven je eigen keuzes verdedigen. Juist daardoor ben ik veel verder geraakt dan ik ooit had verwacht.





Business plan

Op 28 april 2026 werd het businessplan gepitcht aan leden van Voka, het Vlaams netwerk van ondernemingen. Tijdens deze presentatie werd feedback verzameld van professionals met ervaring in ondernemerschap en bedrijfsontwikkeling.

De ontvangen feedback richtte zich voornamelijk op de haalbaarheid van bepaalde kostenposten, de prijszetting van het systeem en de financiële onderbouwing van het businessmodel. Daarnaast werd gewezen op het belang van het opnemen van bijkomende kosten, zoals onboarding en implementatie. Deze inzichten vormden een waardevolle bijdrage aan de verdere verfijning van het businessplan en werden meegenomen in de finale uitwerking.

Context

Kleinschalige biologische boeren in Europa telen een steeds grotere diversiteit aan gewassen, elk met hun eigen ideale bewaaromstandigheden. Hoewel de sector sterk groeit en de Europese Unie tegen 2030 wil dat 25% van het landbouwareaal biologisch wordt beheerd, blijft de beschikbare bewaarinfrastructuur achter. De meeste bestaande koelsystemen zijn ontwikkeld voor grootschalige monoculturen en sluiten onvoldoende aan bij de noden van kleine boeren die met een brede variatie aan gewassen werken.



Figuur 81: Context

Probleem

Een aanzienlijk deel van het verse voedsel gaat verloren tussen oogst en consumptie door ongeschikte opslagomstandigheden. In de Europese Unie bedraagt de voedselverspilling ongeveer 90 miljoen ton per jaar, waarvan naar schatting 40% verband houdt met foutieve bewaring. Voor kleinschalige biologische boeren is gewasspecifieke koeling vaak financieel onhaalbaar. Een koelcel met bevochtiging kost al snel meer dan €10.000 in aankoop en ongeveer €3.300 per jaar aan elektriciteit. Daarnaast is een geïsoleerde ruimte van minstens 12 m³ nodig en kan slechts één temperatuur en luchtvochtigheid tegelijk worden ingesteld. Voor boeren die bijvoorbeeld tomaten, appels en wortelen naast elkaar bewaren, elk met andere optimale bewaaromstandigheden, vormt dit een belangrijke beperking.

90 miljoen ton

voedselverlies enkel in de
landbouwsector in EU

Figuur 82: Probleem





Figuur 83: Oplossing

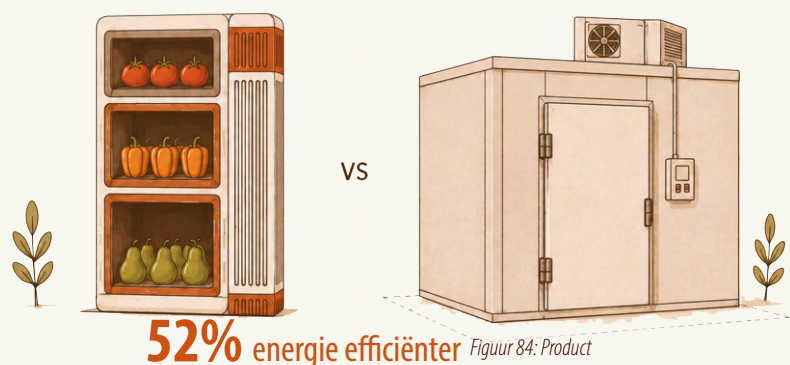
De oplossing

Boroud is een modulair bewaarsysteem dat gebruikmaakt van verdampingskoeling, geïnspireerd op traditionele technieken zoals de zeerpot en de badgir. Een centrale ventilatietoren leidt lucht langs poreuze kleiwanden. Water wordt via capillaire werking in de klei opgenomen en verdampt aan het oppervlak, waardoor warmte aan de wand wordt onttrokken. De afgekoelde wand verlaagt vervolgens de temperatuur in de gekoppelde opslagunit via geleiding en convectie. Sensoren meten continu de temperatuur en luchtvochtigheid, zodat elke unit afzonderlijk kan worden afgestemd op de optimale bewaaromstandigheden van het gewas.

Product

Boroud bestaat uit twee onderdelen: een centrale ventilatietoren en modulaire opslagunits. De ventilatietoren vormt het hart van het systeem en bevat onder andere een ventilator, een ESP32 wifi module, watersensoren, OLED schermen per unit en temperatuur en vochtsensoren per opslagzone. Aan deze toren worden de opslagunits gekoppeld. Elke unit bevat een 3D geprint kleipaneel van 450×450 mm met een kern van zand en water die als bevochtigingsmedium fungeert. Unit A heeft een opslagcapaciteit van 90 liter, terwijl Unit B met 45 liter geschikt is voor kleinere volumes of gewassen met specifieke bewaarvereisten.

Boroud werd ontwikkeld als een energiezuinig alternatief voor de klassieke koelcel, specifiek afgestemd op de behoeften van kleinschalige biologische boeren. Naast het creëren van optimale bewaaromstandigheden voor verschillende gewassen wil het systeem ook het energieverbruik van opslag beperken. Uit de uitgevoerde analyse blijkt dat Boroud ongeveer 52% energie efficiënter is per liter opslagcapaciteit dan een klassieke koelcel met bevochtiging. Hoewel een traditionele koelcel lagere temperaturen kan bereiken, biedt Boroud het voordeel dat verschillende gewassen gelijktijdig kunnen worden bewaard onder uiteenlopende temperatuur en vochtigheidscondities. Hierdoor sluit het systeem beter aan bij de realiteit van boeren die een grote diversiteit aan gewassen telen en bewaren.



Waarom nu?

Drie ontwikkelingen maken dit het juiste moment voor BOROUD. Ten eerste blijven de energieprijzen stijgen, waardoor conventionele koeling steeds minder betaalbaar wordt voor kleinschalige landbouwbedrijven. Ten tweede groeit de biologische landbouw sterk. In de Europese Unie is het biologisch landbouwareaal de afgelopen tien jaar met 105% toegenomen en de Europese Green Deal streeft naar 25% biologisch landbouwareaal tegen 2030. Ten derde voorspellen klimaatmodellen op basis van het CMIP6-model een uitbreiding van droge regio's, zowel binnen als buiten Europa. Aangezien verdampingskoeling het meest efficiënt werkt in droge omstandigheden, vergroot dit het toepassingspotentieel van het systeem.

435000

Biologische producenten in EU: 11%

25%

EU-doelstelling biologisch
landbouwareaal tegen 2030

105% groei in de afgelopen 10 jaar
MARKTPOTENTIEEL

Marktgrootte

TAM – Total Addressable Market

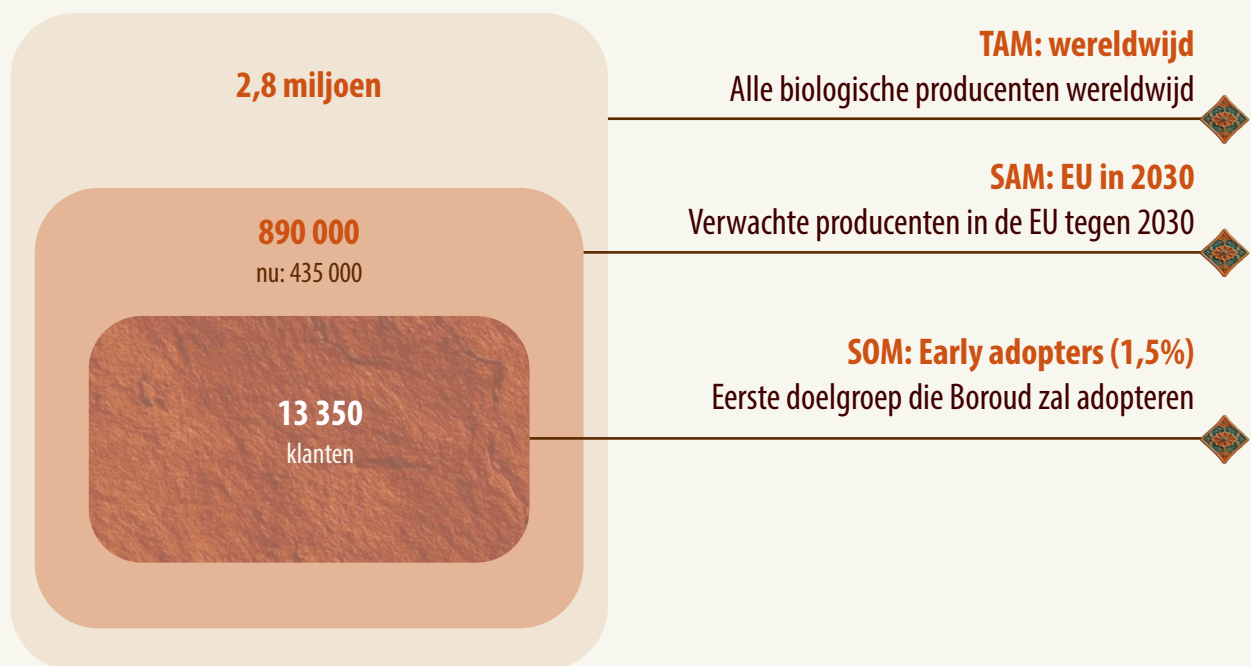
Wereldwijd zijn er ongeveer 2,8 miljoen biologische producenten (FiBL, 2025).

SAM – Serviceable Addressable Market

Binnen de Europese Unie zijn vandaag ongeveer 435.000 biologische producenten actief op 11% van het totale landbouwareaal (FiBL, 2025). Om de doelstelling van 25% biologisch landbouwareaal tegen 2030 te behalen, wordt een groei van 105% verwacht. Dit komt overeen met ongeveer 890.000 biologische boeren in de EU tegen 2030.

SOM – Serviceable Obtainable Market

De eerste doelgroep bestaat uit de zogenoemde early adopters: boeren die bereid zijn een nieuwe technologie uit te proberen voordat deze breed ingeburgerd is. Wanneer 1,5% van de verwachte 890.000 biologische boeren bereikt wordt, komt dit neer op ongeveer 13.350 potentiële klanten. Na succesvolle implementaties kan deze groep verder groeien via mond-tot-mondreclame en adoptie binnen de biologische landbouwgemeenschap.



Concurrentie en marktpositionering

Een klassieke koelcel heeft een gemiddelde capaciteit van ongeveer 7.700 liter en verbruikt €3.300 per jaar aan elektriciteit. BOROUD biedt met drie Unit A's een opslagcapaciteit van 270 liter en verbruikt slechts €60 per jaar. Vergeleken per liter opslagcapaciteit is BOROUD daarmee ongeveer 52% energie-efficiënter dan een klassieke koelcel met bevochtiging. De Janny MT biedt passieve koeling voor ongeveer 600 liter aan een aankoopprijs van €450, maar vereist een bestaande koelruimte en biedt geen gewasspecifieke zonering.

Boroud positioneert zich niet als een directe concurrent van bestaande opslag- en koelsystemen, maar richt zich op een behoefte die vandaag grotendeels onbeantwoord blijft: betaalbare gewasspecifieke koeling en bevochtiging voor kleinschalige boeren. Het systeem vereist geen aparte infrastructuur, heeft een laag energieverbruik en kan modulair worden uitgebreid naargelang het aantal gewassen en de benodigde opslagcapaciteit.

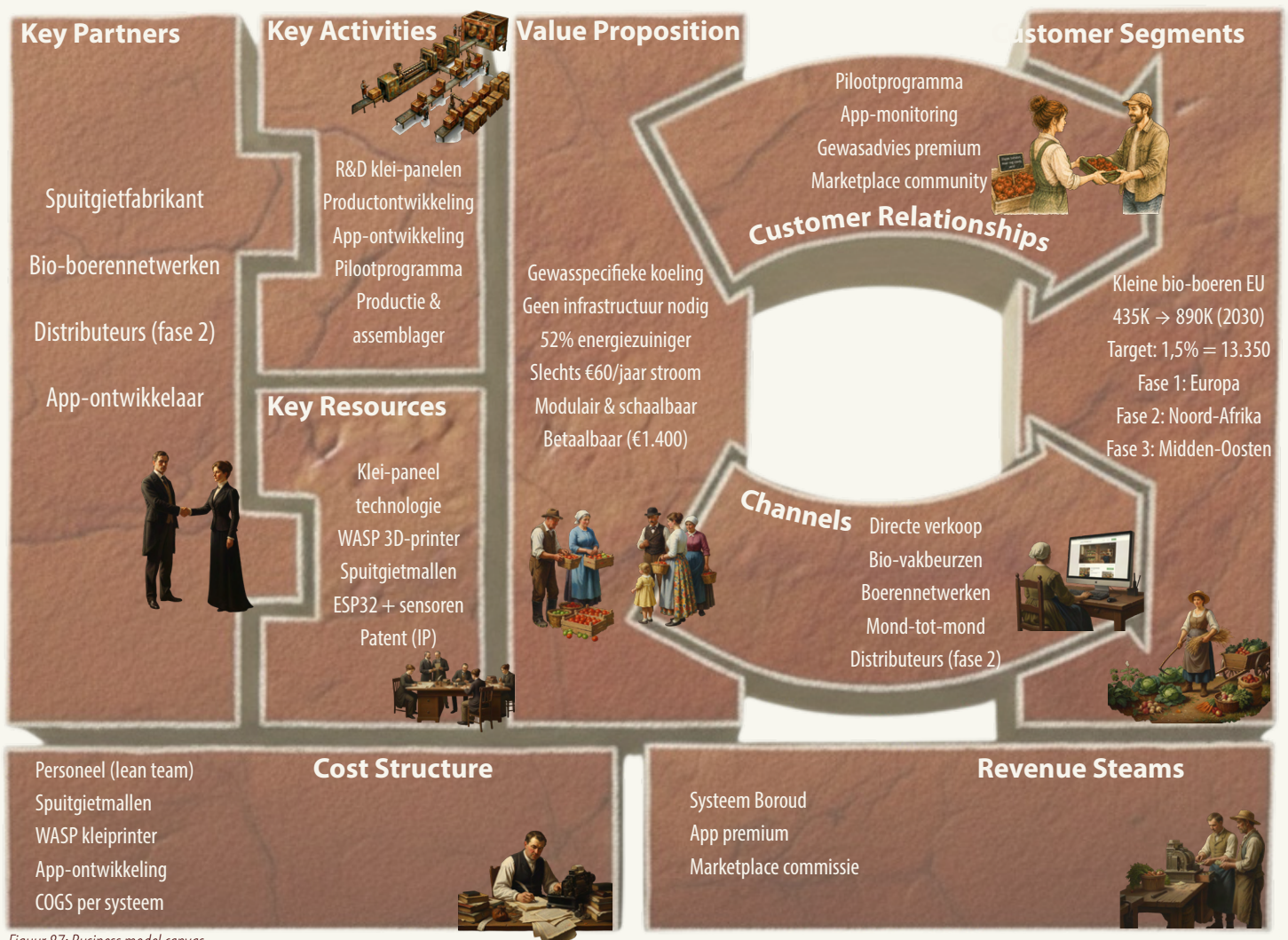
	Koelcel	CA-cel	Janny MT	Schuur/kelder	BOROUD
Prijs aankoop	€10 000	€60 000 - €120 000	€450	€0	€1400
Stroom	€3300/jaar ⚡⚡⚡⚡	€3300/maand ⚡⚡⚡⚡	-	€0 ⚡	€60/jaar
Gewasspecifiek	✗	✗	✓	✗	✓
Kleine boer	✗	✗	Werkt enkel in een koelcel	✓	✓

Figuur 85: Concurrentie

Businessmodel

Het businessmodel van BOROUD functioneert als een betrouwbare partner voor kleine biologische boeren, waarbij traditionele kennis wordt gecombineerd met moderne innovatie. De kern is een energiezuinige koelingseenheid geïnspireerd op eeuwenoude technieken, die gewassen bewaart met minimaal energieverbruik. Een bijbehorende app biedt gewasadvies, real-time monitoring en een marketplace voor restooft. De inkomsten vloeien voort uit hardwareverkoop en marketplace-commissies, terwijl een modulair en schaalbaar systeem een langdurige relatie met de boer ondersteunt. Door lage-energietechnologie te integreren met digitale tools levert het model zowel tastbare producten als flexibele diensten, wat resulteert in een praktische oplossing voor uiteenlopende landbouwbehoeften.

Onderdeel	Kostprijs	Verkoopprijs	Marge
Ventilatieoren	€126	€950	87%
Unit A (90L)	€101	€150	33%
Unit B (45L)	€79	€120	34%
Systeem toren + 3x Unit A	€429	€1400	69,4%



Figuur 87: Business model canvas

App

De BOROUD-app is beschikbaar in drie lagen. De gratis versie biedt real-time monitoring van temperatuur en luchtvochtigheid per unit. Wie meer wil, kiest voor de premiumversie aan €3 per maand: die geeft toegang tot gewasadvies, spoilage-alerts, seizoensplanning en de marketplace, met vijf gewassen inbegrepen. Extra gewassen kunnen per stuk worden toegevoegd voor €0,99 éénmalig.

Marketplace

Via de geïntegreerde marketplace kunnen boeren restooft gratis aanbieden aan lokale kopers, restaurants en markthandelaars. De koper betaalt een commissie van 8% bij aankoop via het platform.

Parallel businessmodel

Een tweede businessmodel kan parallel worden uitgerold, waarbij een deel van de winst wordt geïnvesteerd in het leveren van koelunits aan boeren in ontwikkelingslanden. Deze units zijn bijzonder geschikt voor droge, warme klimaten zoals in Irak waar de elektriciteitsvoorziening onbetrouwbaar en frequent onderbroken is. Omdat BOROUD gebaseerd is op verdampingskoeling werkt het systeem met minimale energie. Met kleine aanpassingen kan het in droge, warme landen zelfs volledig zonder elektriciteit functioneren, omdat verdamping in die klimaten van nature efficiënter verloopt door de lage luchtvochtigheid en hoge omgevingstemperaturen.

Team:

In 2026 start BOROUD met een klein kernteam: de oprichter (voltijds) en één freelance tech engineer voor de R&D en prototypeontwikkeling. In 2027, tijdens het pilootprogramma, komt er een freelance software developer bij voor de app. Bij de officiële lancering in 2028 wordt een deeltijdse marketing medewerker toegevoegd. Naarmate de verkoop groeit in 2029 komen er een productiemanager en een operations medewerker bij, gevolgd door extra productie- en saleskracht in 2030. Het team groeit zo mee met de omzet, van 2 mensen bij de start tot 8 medewerkers in 2030.





Financiering

Investering

€1 000 000

Gespreid over 4 rondes (2026-2029)

Personeel (oprichter + freelancers)	€200.000
Prototype & R&D materiaal	€30.000
WASP kleiprinter	€25.000
Spuitsietmallen (na validatie)	€125.000
App-ontwikkeling	€80.000
Marketing & distributie	€50.000
Overige operationele kosten	€493.900

Beurs Future Generations (Prototyping)

- €3900

Groei en omzetprognose

	Klanten	Jaar	Omzet-
Pilot	2 gratis	2027	€0
Lancering	50	2028	€70k
Groei x7	350	2029	€495k
Schaal x7	2450	2030	€3,5 mln
Uitrol x7	8000	2031	€11,5 mln

Boroud vraagt een totale investering van €1.000.000, gespreid over vier rondes tussen 2026 en 2029. Deze gefaseerde aanpak laat toe om het kapitaal in te zetten naarmate het product bewezen wordt: een seed-ronde in 2026 voor R&D en teamopbouw, een bridge-ronde in 2027 na validatie door de pilootboeren, een lanceringsinvestering in 2028 voor de eerste productie-run en marketing, en een groeironde in 2029 om de ×7-expansie te financieren vóór de omzet die kosten volledig dekt. De Stichting Future Generations heeft reeds een beurs van €3.900 toegekend in het kader van de "Prototyping Low Carbon Solutions"-call, wat de netto investeringsvraag op €1.000.000 brengt.

De omzetgroei volgt een ×7-model per jaar na lancering, gebaseerd op mond-tot-mondreclame binnen de biologische boeren-netwerken. Vanaf 50 betalende klanten bij lancering in 2028 groeit BOROUD naar 8.000 klanten en een omzet van €11,5 miljoen in 2031. Break-even wordt bereikt in 2030, jaar drie na de officiële marktintroductie.

VENTILATIE TOREN

Ventilator (18W)	aankoop	€8,00
ESP32 (wifi)	aankoop	€4,50
Watersensor (×2)	aankoop	€3,00
OLED-scherm (×3)	aankoop	€6,00
Temp/vochtsensor (×3)	aankoop	€6,00
Zijplaten HDPE (×2)	sputgieten	€8,00
Boven/onderplaat + deksel	sputgieten	€6,00
Schroeven RVS (×16)	aankoop	€2,00
Assemblage + QC	productie	€15,00

Subtotaal	€126
Verkoopprijs	€950
Marge	87%

UNIT A — 90L

Unit box bovenkant HDPE	sputgieten	€6,00
Unit box onderkant HDPE+PUR	sputgieten	€9,00
Deur HDPE+PUR (×3)	sputgieten	€12,00
Steunplaat HDPE	sputgieten	€3,00
Rubber afdichting (×3)	aankoop	€3,00
Zeerpot chamotte (×4)	slipcasting	€28,00
Waterreservoir 3,5L (×4)	aankoop	€8,00
Waterbak + steun HDPE (×4)	sputgieten	€8,00
Dop vacuüm (×4)	aankoop	€4,00
Assemblage + QC	productie	€12,00

Subtotaal	€101
Verkoopprijs	€150
Marge	33%

KOSTPRIJSOVERZICHT

Ventilatie toren	€126
Unit A (×3)	€303
Kostprijs systeem	€429
Verkoopprijs systeem	€1.400
Marge systeem	69,4%
excl. BTW · toren + 3× Unit A	

UNIT B — 45L

Kostprijs	€79
Verkoopprijs	€120
Marge	34%

Energieverbruik systeem/jaar
18W · 157,7 kWh/jaar ≈ €60/jaar





A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Variables and assumptions																		
Define reference year (year before operations start)				2025		2026		2027		2028		2029		2030		2031		2032
Sales																		
Product direct cost (COGS) excluding personnel		INPUT	31%			0		0		0		0		0		0		0
Operational costs net COGS		CALC				(23.125)		(29.355)		(29.853)		(124.134)		(18.493)		(16.543)		(28.158)
total direct and non direct cost (excl manag and pers)		CALC				(23.125)		(29.355)		(51.553)		(191.835)		(1.119.610)		(3.570.748)		(684.647)
Management fee		INPUT	(as pos number)			0		0		0		0		0		0		0
Personnel cost - activated R&D		CALC				105.000		159.650		172.396		284.109		348.908		0		0
Activation of investments																		
New investments		CALC				30.000		50.000		120.000		-		-		-		-
Depreciation investments Y-1		CALC				-		9.900		19.900		24.300		24.000		24.000		14.000
Depreciation new investments		CALC				9.900		10.000		14.000		24.000		24.000		14.000		10.000
(total of depreciation)		CALC				9.900		19.900		33.900		24.300		24.000		24.000		14.000
ACTIVATION OF R&D		CALC				-		-		-		-		-		-		-
Total of new investments		CALC				30.000		50.000		120.000		-		-		-		-
Total of depreciation investments Y-1		CALC				-		9.900		19.900		24.300		24.000		24.000		14.000
Total of depreciation new investments		CALC				9.900		10.000		14.000		24.000		24.000		14.000		10.000
(total of depreciation)		CALC				9.900		19.900		33.900		24.300		24.000		24.000		14.000
book value						20.100		50.200		136.300		112.000		88.000		64.000		50.000
Owners equity		INPUT																
Long term debt																		
Short term debt																		
Financial investments																		
Accounts receivables/payables																		
% dividend (on net profit of current year)		%		0%														
% of taxes (profit before taxes)		%		25%														
Credit to suppliers and customers																		
Commercial credit to suppliers (expressed in days)		365		30														
Commercial credit to customers (expressed in days)		365		30														
Stocks		365																
accounts receivables		CALC				0		0		5.753		40.656		284.975		942.333		176.975
accounts payables		CALC				(1.901)		(2.413)		(4.237)		(15.767)		(92.023)		(299.486)		(56.272)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
	Investments	€				2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035										
		new				30.000	50.000	120.000	0	0	0	0	0	0	0										
		depreciation new				9.900	10.000	14.000	0	0	0	0	0	0	0										
		Depreciation Y-1				0	9.900	19.900	24.300	24.000	24.000	14.000	10.000	10.000	10.000										
		Total				9.900	19.900	33.900	24.300	24.000	24.000	14.000	10.000	10.000	10.000										
		activated				20.100	50.200	136.300	112.000	88.000	64.000	50.000	40.000	30.000	20.000										
						2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035										
						depre	saldo	depre	saldo	depre	saldo	depre	saldo	depre	saldo	2031	2032	2033	2034	2035					
1	Prototype & R&D materiaal	2026	20.000	33%		6.600	13.400	6.600	6.800	6.600	200	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	ICT & software tools	2026	10.000	33%		3.300	6.700	3.300	3.400	3.300	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Afschrijvingen op 3 jaar	2026	0	33%		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Afschrijvingen op 20 jaar	2026	0	10%		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			30.000			9.900	20.100	9.900	10.200	9.900	300	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	WASP kleiprinter	2027	25.000	20%				5.000	20.000	5.000	15.000	5.000	10.000	5.000	5.000	5.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Testapparatuur & tooling pilots	2027	25.000	20%				5.000	20.000	5.000	15.000	5.000	10.000	5.000	5.000	5.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Communication	2027	0	33%				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Apparatus	2027	0	25%				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			50.000					10.000	40.000	10.000	30.000	10.000	20.000	10.000	10.000	10.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Spuitgietsmallen (na validatie)	2028	100.000	10%				10.000	90.000	10.000	80.000	10.000	70.000	10.000	60.000	10.000	60.000	10.000	50.000	10.000	40.000	10.000	30.000	10.000	20.000
10	Extra productie-apparatuur	2028	20.000	20%				4.000	16.000	4.000	12.000	4.000	8.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
11	Communication	2028	0	33%				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Apparatus	2028	0	25%				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			120.000							14.000	14.000	92.000	14.000	78.000	14.000	64.000	14.000	50.000	10.000	40.000	10.000	30.000	10.000	20.000	20.000
13	patent	2029	0	5%								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Office furniture	2029	0	10%								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Communication	2029	0	33%								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Apparatus	2029	0	25%								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			0									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	Computer en software	2030	0	25%								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Personnel	€	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2026	2027	2028	2029	2030
TOTALS	FTE	1,5	2,5	2,5	4,0	5,0	0	0	0	0	0	0	0	105.000	159.650	172.396	284.109	348.908
Management														40.000	41.200	76.915	114.736	118.178
	FTE																	
General Management		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40.000	41.200	42.436	43.709	45.020
CEO	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40.000	41.200	42.436	43.709	45.020
COO	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
CFO	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
secretaries	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
Marketing / Economics		0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34.479	71.027	73.158
	FTE																	
manager	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
project manager	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	34.479	71.027	73.158
junior	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
Projectteam														65.000	118.450	95.481	133.859	101.296
	FTE																	
R&D / Product Development		1	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	65.000	118.450	95.481	62.832	28.138
	FTE																	
manager	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
project manager	2	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	65.000	66.950	68.950	35.514	0
junior	4	0,0	1,0	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	51.500	26.523	27.318	28.138
														0	0	0	0	0
Production & Engineering		0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71.027	73.158
	FTE																	
manager	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
project manager	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	71.027	73.158
junior	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
Support team														0	0	0	35.514	129.434
	FTE																	
Product management & Sales		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56.275
	FTE																	
manager	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
project manager	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
junior	4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	56.275	0
														0	0	0	0	0
Operations and finance		0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.514	73.158
	FTE																	
manager	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0
project manager	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	35.514	73.158
operator	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0

Funds Flow		€					
Item	REF	2026	2027	2028	2029	2030	
Cash available at end year Y-1	A	-	139.974	100.457	68.931	291.204	
Owners' equity changes	B	300.000	200.000	250.000	250.000	-	
Long term loan changes	C	-	-	-	-	-	
Short term loan changes	D	-	-	-	-	-	
Income	E1	-	-	70.000	494.650	3.467.200	
Changes in Accounts receivable	E2	-	-	(5.753)	(34.903)	(244.319)	
Other receivables	F	-	-	-	-	-	
Funds resources	G=SUM	300.000	339.974	414.704	778.678	3.514.085	
Investments on new fixed assets	H	(30.000)	(50.000)	(120.000)	-	-	
Other debts	I	-	-	-	-	-	
Changes in Accounts payable	J	(1.901)	(512)	(1.824)	(11.530)	(76.256)	
Change of inventories	K	-	-	-	-	-	
Total of costs excluding depreciation	L	(128.125)	(189.005)	(223.949)	(475.944)	(1.468.518)	
Financial costs	M	-	-	-	-	-	
Income Tax	N	-	-	-	-	(573.724)	
Shareholders remuneration	O	-	-	-	-	-	
Funds destinations	P=SUM	(160.026)	(239.517)	(345.773)	(487.474)	(2.118.497)	
Funds flow	G+P	139.974	100.457	68.931	291.204	1.395.587	

Goods and Services		€		2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Total of operational costs excluding investments															
Total operational cost excluding investments and personnel															
Personnel cost	Full time equivalents (FTE)			1,5	2,5	2,5	4,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Direct and indirect cost															
Rent	m2/pers	10,0	price	100,0	euro/m2/jaar										
n roos															
antal m2 dat 1 personeelslid krijgt															
gemiddeld over alle loonklassen															
Office															
tel & fax & internet		1.000,0	1,0	1.500	2.500	2.500	4.000	5.000	0	0	0	0	0	0	0
Office tools		1.000,0	1,0	1.500	2.500	2.500	4.000	5.000	0	0	0	0	0	0	0
Documentation, education and training		1.000,0	1,0	1.500	2.500	2.500	4.000	5.000	0	0	0	0	0	0	0
Overhead															
social office		50,0	1,0	75	125	125	200	250	0	0	0	0	0	0	0
lawyer (legal consultant)		5.000,0	1,0	100%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%
PR related		5.000,0	1,0	100%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%	104%
accountant fee		4.000,0	1,0	100%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%	102%
peripherals															
gas, water, electricity etc		200,0	1,0	300	500	500	800	1.000	-	-	-	-	-	-	-
Travel & Mobility		1.500,0	1,0	2.250	3.750	3.750	6.000	7.500	0	0	0	0	0	0	0
Investments															
new				30.000	50.000	120.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
depreciation new				9.900	10.000	14.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciation Y-1				0	9.900	19.900	24.300	24.000	24.000	14.000	10.000	10.000	10.000	0	0
Total				9.900	19.900	33.900	24.300	24.000	24.000	14.000	10.000	10.000	10.000	0	0
activated				20.100	50.200	136.300	112.000	88.000	64.000	50.000	40.000	30.000	20.000	0	0

Figurenlijst

- Figuur 1: Voedselverlies
Figuur 2: Onderzoeksaanpak
Figuur 3: Verdampingskoeling in Egypte
Figuur 4: Zeerpot
Figuur 5: Groenten in Zeerpot
Figuur 6: Experimenten met geschilderde potten
Figuur 7: Hoe wordt gangina gemaakt?
Figuur 8: Binnenkant gangina
Figuur 9: Gangina versus styrofoam
Figuur 10: Windtoren in Yazd, Perzië
Figuur 11: Werking van de badgir
Figuur 12: Royal Chelsea Hospital
Figuur 13: X-vormige schoepen
Figuur 14: Qanat-systeem
Figuur 15: Effect van temperatuurverlaging
Figuur 16: Chilling injury bij tomaten
Figuur 17: Badgir met qanat
Figuur 18: Controlled Atmosphere-opslag bij appels
Figuur 19: Pomodori da Appendere
Figuur 20: Interview met kleinschalige boer
Figuur 21: Janny MT Storage Module
Figuur 22: Compartimentering van gewassen
Figuur 23: Ventilatie in de koelunit
Figuur 24: Applicatie-interface
Figuur 25: Eerste conceptschetsen
Figuur 26: Droge klimaatregio's
Figuur 27: Brainstormingproces
Figuur 28: Conceptschema
Figuur 29: Afmetingen van de zeerpot
Figuur 30: Zeerpotconcept
Figuur 31: Zeerpot met ventilatieprincipe
Figuur 32: Geoptimaliseerd zeerpotconcept
Figuur 33: Ondol-principe
Figuur 34: Schema van bevochtiging
Figuur 35: Definitieve afmetingen van de zeerpot
Figuur 36: Prototype parallelle ventilatie
Figuur 37: Gangina gecombineerd met styrofoam
Figuur 38: Prototyping met styrofoam
Figuur 39: Voorbereiding van klei
Figuur 40: Productarchitectuur van Boroud
Figuur 41: P95 duimdikte
Figuur 42: Afmetingen van eurokragen
Figuur 43: Afmetingen van unit A en B
Figuur 44: Sterkteberekening
Figuur 45: Ventilatorpositie bovenaan
Figuur 46: Vorming van wervels
Figuur 47: Parallelle stroming met wervels
Figuur 48: Diagonale ribbenstructuur
Figuur 49: Zeerpot met diagonale ribben
Figuur 50: Flow-simulatie
Figuur 51: Turbulentiesimulatie
Figuur 52: Resultaten van CFD-simulatie
Figuur 53: Capillaire werking in klei
Figuur 54: Waterdistributie in de kleiwand
Figuur 55: Capillaire werking met vacuümreservoir
Figuur 56: Vacuümreservoir – concept 2
Figuur 57: Vacuümreservoir – concept 3
Figuur 58: Bevochtigingssysteem
Figuur 59: Binnenzijde van de windtoren
Figuur 60: Extra koelende wand
Figuur 61: CFD-simulatie van Boroud
Figuur 62: CAD-model van Boroud
Figuur 63: Temperatuur- en vochtigheidscondities per unit
Figuur 64: Ergonomische analyse van de boer
Figuur 65: Perspectiefweergave van Boroud
Figuur 66: Vereenvoudigd systeemmodel
Figuur 67: Exploded view van Boroud
Figuur 68: Flyer van Boroud
Figuur 69: Interface flow
Figuur 70: Interface flow – vervolg
Figuur 71: Overzicht van de gebruikersinterface
Figuur 72: Toegevoegde waarde – duurzaamheid
Figuur 73: Toegevoegde waarde – gewasspecifieke opslag
Figuur 74: Toegevoegde waarde – energie-efficiëntie
Figuur 75: User journey
Figuur 76: User journey – onderhoud
Figuur 77: Evaluatie en feedback
Figuur 78: Look and Feel moodboard
Figuur 79: Boroud – esthetische uitwerking
Figuur 80: Mashrabiya-inspiratie
Figuur 81: Businessplan – context
Figuur 82: Businessplan – probleemstelling
Figuur 83: Businessplan – oplossing
Figuur 84: Businessplan – product
Figuur 85: Concurrentieanalyse
Figuur 86: Marktanalyse
Figuur 87: Business Model Canvas
Figuur 88: Team en stakeholders

Gebruik van AI

In het kader van dit onderzoek werd gebruikgemaakt van artificiële intelligentie (AI) als ondersteunend hulpmiddel tijdens verschillende fasen van het ontwerpproces. AI werd ingezet voor exploratie en inspiratie, het herformuleren en verbeteren van teksten, en als ondersteuning bij het structureren van ideeën. Daarnaast werd AI gebruikt om zelfgemaakte schetsen en visualisaties verder te verfijnen en de beeldkwaliteit te verbeteren. Het gegenereerde beeldmateriaal is steeds gebaseerd op eigen ontwerpen en werd onder eigen sturing en controle ontwikkeld.

Alle inhoud, analyses, ontwerpbeslissingen en conclusies werden kritisch geëvalueerd en finaal bepaald door de auteur. AI fungeerde uitsluitend als ondersteunend instrument en niet als vervanging van eigen onderzoek, ontwerpwerk of academisch oordeel.

De gebruikte AI-systemen zijn ChatGPT, Claude, Perplexity en Gemini.

Bronnen

Google. (2024). Gemini [Large language model en beeldgeneratietool]. <https://gemini.google.com/>

Anthropic. (z.j.). Claude [Large language model]. <https://claude.ai/>

OpenAI. (2023). ChatGPT (GPT-4) [Large language model]. <https://chat.openai.com/>

Perplexity AI. (z.j.). Perplexity AI [AI-zoek- en antwoordtool]. <https://www.perplexity.ai/>

Referentielijst

- Alanis Zeoli, A., Pacak, A., Gendebien, S., Chorowski, M., Laboratory of Applied Thermodynamics, Aerospace and Mechanical Engineering Department, University of Liège, Department of Cryogenics and Aviation Engineering, Faculty of Mechanical Power and Engineering, Wrocław University of Science and Technology, & Faculty of Building Science and Technology, Tsinghua University. (2025). Feasibility analysis of desiccant evaporative cooling technologies in various climate conditions: present and future potential. *Energy*, 1–22.
- Asmaakhattab, V. A. P. B. (2014, 28 januari). *Hassan Fathy (1900-1989) An Egyptian ambition*. Walk Like An Egyptian. <https://walklikeanegyptianblog.wordpress.com/2012/01/25/hassan-fathy-1900-1989-an-egyptian-ambition/>
- Azene, M., Workneh, T. S., & Woldetsadik, K. (2011). Effect of packaging materials and storage environment on postharvest quality of papaya fruit. *Journal Of Food Science And Technology*, 51(6), 1041–1055. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0607-6>
- Bakker, L., Bons, J. J. M., Sterling, E. P., & Sprenger Instituut. (1980). *INVENTARISATIE FRUITKOELHUIZEN* (Rapport-no. 2143).
- Bakker, L., & Van Beek, Ir. G. (z.d.). Hoe fruit beter bewaren? *MINISTERIE VAN LANDBOUW EN VISSERIJ*.
- Beaudry, R. M. & Department of Horticulture, Michigan State University. (1999). Effect of O₂ and CO₂ partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. In *Postharvest Biology And Technology* (Vol. 15, pp. 293–303).

- Brackevelt, A., Sonneveld, E., Vervaeke, M., OVAM, Roels, K., Storms, S., Van Bogaert, T., Vanhee, M., Van Loo, M., & Departement Landbouw en Visserij. (2023). *Monitor voedselverlies 2020*. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/56709>
- Choudhary, B. S., T, R. K., & Dewangan, S. K. (2023). Review Study for Performance Analysis of an Evaporative (Pot in Pot) Cooling System. *E3S Web Of Conferences*, 430, 01253. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001253>
- Dai, O., Wang, Y., Meining Li, Wanxin Hong, Xin Lei, Ziwei Ye, Pang, J., & Yilan Sun. (2025). Post-harvest precooling technology and fresh-keeping mechanism of fruits and vegetables: A review. In *Postharvest Biology And Technology* [Journal-article]. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113623>
- De Zwart, H. F., Agrotechnology and Food Innovations (voorheen IMAG), Wageningen, InnovatieNetwerk Groene Ruimte en Agrocluster, Stichting Innovatie Glastuinbouw, Programmateam speerpunt “Kas als Energiebron”, & InnovatieNetwerk. (2003). Verwarmings-, koel- en ontvochtigingscapaciteit van Fiwihex warmtewisselaars. In *Verwarmings-, Koel- en Ontvochtigingscapaciteit van Fiwihex Warmtewisselaars*.
- Defraeye, T., Shoji, K., Schudel, S., Onwude, D., & Shrivastava, C. (2023). Passive evaporative coolers for postharvest storage of fruit and vegetables: Where to best deploy them and how well do they perform. *Frontiers in Food Science And Technology*, 3. <https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1100181>
- DEPARTEMENT LANDBOUW & VISSERIJ. (2022). Fiche vergroening gewasdiversificatie – campagne 2022. In *DEPARTEMENT LANDBOUW & VISSERIJ* (pp. 2–5). https://lv.vlaanderen.be/sites/default/files/attachments/fiche_vergroening_-_gewasdiversificatie_-_versie_08042022.pdf
- Dora, M., Van Goubergen, D., De Steur, H., Gellynck, X., & Ghent University. (2013). Magnitude of “food loss” in Belgian food processing industry: Results from multiple case studies. In *Proceedings Of The 2013 Industrial And Systems Engineering Research Conference*.
- Dora, M., Wesana, J., Gellynck, X., Seth, N., Dey, B., & De Steur, H. (2019). Importance of sustainable operations in food loss: evidence from the Belgian food processing industry. *Annals Of Operations Research*, 290(1–2), 47–72. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03134-0>
- Duret, S., Aubert, C., Annibal, S., Derens-Bertheau, E., Cottet, V., Jost, M., Chalot, G., Flick, D., Moureh, J., Laguerre, O., Mérendet, V., & Desnoues, E. (2024). Impact of harvest maturity and storage conditions on tomato quality: A comprehensive experimental and modeling study. *Postharvest Biology And Technology*, 219, 113286. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113286>
- Edel GALLEIN. (2005). De klimatisatie van de Boekentoren : conservatie van boeken. In B. VERSCHAFFEL, A. JANSSENS, & H. BREESCH, *Universiteit Gent*.
- Environmental Conditions for Danish Storage Buildings: A Summary of 20 Years of Air Quality Surveys. (2025). *Studies in Conservation*, 148–169.

- Fang, Y., & Wakisaka, M. (2021). A Review on the Modified Atmosphere Preservation of Fruits and Vegetables with Cutting-Edge Technologies. *Agriculture*, 11(10), 992. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100992>
- Hejazi, Z., Nawakht, N. A., Hedayat, Y. M., & Giordani, E. (2022). Styrofoam Packaging as Alternative of the Afghan Traditional “Gangina” Container to Extend Quality of ‘Taifi’ Grapes in Room Temperature Storage. *Journal Of Packaging Technology And Research*, 7(1), 35–41. <https://doi.org/10.1007/s41783-022-00148-1>
- Huelin, Tindale, Vickery, Hall, Sykes, Martin, Cerny, Van Doren, Smock, Eaves, Stevenson, Blake, Scott, & Coote. (z.d.). *CONTROLLED ATMOSPHERE STORAGE OF DELICIOUS APPLES*.
- ILVO, Relaes, J., Claeys, E., Riebbels, G., Ampe, F., Jacobs, N., Pauwels, L., Van Poucke, E., & Leroy, S. (2024). *Annual report 2024* (M. Levenson, Vert.). Joris Relaes. <https://www.ilvo.vlaanderen.be>
- Kangina. (z.d.). Grokipedia. <https://grokipedia.com/page/Kangina>
- Kheirkhah Sangdeh, P., Nasrollahi, N., & Engineering Faculty, Architecture Department, Ilam University, Ilam, Iran. (2022). Windcatchers and their applications in contemporary architecture. In *Energy And Built Environment* (Vol. 3, pp. 56–72). <http://www.keaipublishing.com/en/journals/energy-and-built-environment/>
- KoenBaryon. (2024, 18 maart). Energieverbruik in de landbouwsector - CE monitor. *CE Monitor*. <https://cemonitor.be/indicator/voeding/gebruik-van-input/energieverbruik-in-de-landbouwsector/>
- Maertens, A., Van Lierde, D., Centrum voor Landbouweconomie, & Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap. (2003). *Het energieverbruik in de Vlaamse land- en tuinbouw*.
- Mooren, J., CNH Belgium NV, Mecopol-Kemaspray, & Mooren, J. (2014). Kostprijscalculatie van nieuwe mechanische producten: theorie en praktijk. In W. Bruggeman, *Masterproef* [Thesis].
- Mt, J. (z.d.). *Janny MT | FAQ*. Janny MT. <https://www.jannymt.com/faq.htm?lng=en>
- Nartey, J. (2025). Lessons in Sustainability from the Ancients: Eco-Friendly Practices We Can Revive Today. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5247026>
- Oluwasola, O. & Mobah Rural Horizons. (z.d.). Pot-in-pot Enterprise: Fridge for the Poor. In *Pot-in-pot Enterprise: Fridge For The Poor*.
- Post Harvest Research Centre, Ayub Agriculture Research Institute, Faisalabad, Pakistan, Babu, I., Rashid, S., Noor, H. U., Zulfikar, R., Naeem, H., Rashid, M. H., Kanwal, R., Yasmin, Z., Shafique, B., & Abrar, M. (2025). Controlled atmosphere (CA) storage of apples. In *Journal Of Agriculture And Food* (pp. 103–117) [Journal-article]. <https://doi.org/10.52587/JAF060108>
- Prange, R. K., & Wright, A. H. (2023). A Review of Storage Temperature Recommendations for Apples and Pears. *Foods*, 12(3), 466. <https://doi.org/10.3390/foods12030466>

- Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M. C., Vuong, Q. V., Stathopoulos, C. E., Jessup, A. J., & Golding, J. B. (2017). Use of low-pressure storage to improve the quality of tomatoes. *The Journal Of Horticultural Science And Biotechnology*, 92(6), 583–590. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1301222>
- Rasines, L., Castillejo, N., Miguel, G. S., & Aguayo, E. (2023). Can household storage conditions reduce food waste and environmental impact? A broccoli case study. *The Science Of The Total Environment*, 892, 164779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164779>
- Rehman, D., McGarrigle, E., Glicksman, L., & Verploegen, E. (2020). A heat and mass transport model of clay pot evaporative coolers for vegetable storage. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 162, 120270. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120270>
- Roaf, S. (2008). RESOURCE QUALITY CASCADES IN TRADITIONAL LOW EXERGY TECHNOLOGIES: THE QANATS AND BADGIRS OF YAZD. In *SBO8 Conference*. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB14196.pdf>
- Saagoto, M. S., & Chowdhury, N. (2025). Traditional clay pot coolers as drinking water cooling technology for urban heat adaptation in Bangladesh. *Sustainable Energy Technologies And Assessments*, 83, 104575. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104575>
- Sipho, S., & Tilahun, S. W. (2020). Potential causes of postharvest losses, low-cost cooling technology for fresh produce farmers in Sub-Sahara Africa. *African Journal Of Agricultural Research*, 16(5), 553–566. <https://doi.org/10.5897/ajar2020.14714>
- Sirror, H. (2024). Innovative Approaches to Windcatcher Design: A Review on Balancing Tradition Sustainability and Modern Technologies for Enhanced Performance. *Energies*, 17(22), 5770. <https://doi.org/10.3390/en17225770>
- Skinner, M. K., Haque, C. G. M., Nilsson, E., Bhandari, R., & McCarrey, J. R. (2013a). Environmentally Induced Transgenerational Epigenetic Reprogramming of Primordial Germ Cells and the Subsequent Germ Line. *PLoS ONE*, 8(7), e66318. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066318>
- Skinner, M. K., Haque, C. G. M., Nilsson, E., Bhandari, R., & McCarrey, J. R. (2013b). Environmentally Induced Transgenerational Epigenetic Reprogramming of Primordial Germ Cells and the Subsequent Germ Line. *PLoS ONE*, 8(7), e66318. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066318>
- Sprenger Instituut, & Van Hiele, T. (1972). KOELEN VAN FRUIT EN GROENTE. In *MEDEDELING NR.29*.
- Statbel. (2022). *Kerncijfers landbouw 2022*. https://doc.statbel.fgov.be/publications/S510.01/S510.01N_Kerncijfers_landbouw_2022.pdf
- Tao, J., Zuo, J., Watkins, C. B., Bai, C., He, X., Liu, S., Han, L., Zhao, X., Liu, Y., Li, J., & Zheng, Y. (2024). Low storage temperature affects quality and volatile compounds in fresh tomatoes. *Food Chemistry*, 460(Pt 1), 140400. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140400>

- Timmermans, I., Van Bellegem, L., & Departement Landbouw en Visserij. (2022). De biologische landbouw in 2021. In *Departement Landbouw en Visserij*.
- Ul Hasan, M., Singh, Z., Shah, H. M. S., Kaur, J., & Woodward, A. (2024). Water loss: A postharvest quality marker in apple storage. *Food And Bioprocess Technology*, 17, 2155–2180. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03305-9>
- Unknown. (z.d.). *Windcatcher*.
- Van Holsteijn, F., & Kemna, R. (2017). Minimizing food waste by improving storage conditions in household refrigeration. *Resources Conservation And Recycling*, 128, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.012>
- Vanhellemont, Y. & Laboratorium Renovatie en Erfgoed. (z.d.). *Renovatie van kelders: Binnenklimaat, ventilatie en thermische aspecten*.
- Vlaams Centrum voor Agro- en Visserijmarketing. (z.d.). <https://www.vlaanderen.be/vlam/>
- Wani, N. R., Hussain, S. Z., Naseer, B., Zargar, I. A., Beigh, M., Qadri, T., Bej, G., Fayaz, U., Nazir, N., Akuli, A., & Ghosh, A. (2023). Storage and post-cold storage evaluation of exotic apple varieties harvested at different maturity levels using destructive and non-destructive techniques. *Journal Of Food Composition And Analysis*, 125, 105846. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105846>
- Winkel, A., & Goselink, Y. (2022). *Monitoring van de ammoniakemissie uit een rosekalverstal met v-vormige keldervloer, mestschuif en urineafvoer*. <https://doi.org/10.18174/632077>
- Wucher, H., Klingshirn, A., Brugger, L., Stamminger, R., Kölzer, B., Engstler, A., & Gindele, T. (2021). Evaluation of humidity retention in refrigerator storage systems by application of a food simulant. *International Journal Of Refrigeration*, 130, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.05.017>
- Yang, Q., Dai, F., & Beecham, S. (2022). The influence of evaporation from porous concrete on air temperature and humidity. *Journal Of Environmental Management*, 306, 114472. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114472>
- Żuławińska, J. (2024, 18 januari). *Wet bulb calculator*. Omni Calculator. <https://www.omnicalculator.com/physics/wet-bulb>

