

BULLETTIN

EEN UITGAVE VAN TNO-VOEDING, AFDELING IGMB, WAGENINGEN

MAART 1992

Het koelen van brood

Invloed van temperatuur, vochtigheid en snelheid van de lucht

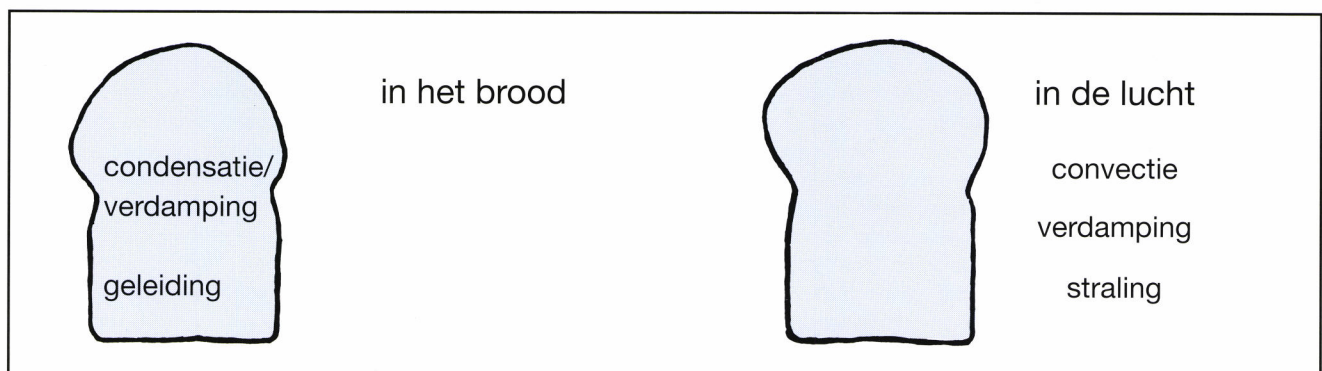
door Ir. U.A. de Vries

Het deel van het broodbereidingsproces dat we in dit bulletin beschrijven, geniet doorgaans weinig aandacht. Als het brood na het bakken in de bakkerij geplaatst wordt is het koelen simpelweg een kwestie van tijd. Je kunt dat proces nog een beetje versnellen door ventilatoren te gebruiken.

Het is wel logisch dat het koelen niet zoveel aandacht krijgt. Brood dat gemaakt is met een slecht bereidingsproces wordt niet beter door de juiste koeling toe te passen. Toch kan je aan de kwaliteit van goed bereid brood wel wat afdoen door het slecht te koelen, bijvoorbeeld te kort, te lang, te koud of te warm. Vandaar dat het toch nuttig kan zijn is aan het koelen enige aandacht te besteden.

Een andere reden voor ons om in dit bulletin aandacht aan het koelen van brood te besteden ligt in onze aanpak van het onderzoek. We hebben namelijk een natuurkundig model gemaakt voor het gehele koelproces. De natuurkundige wetten die bij het koelen een rol spelen kunnen we wiskundig beschrijven. Tenslotte gebruiken we een computer om te berekenen welke consequenties variaties in omgevingstemperatuur, relatieve vochtigheid en luchtsnelheid hebben voor het koelproces. Het voordeel van zo'n aanpak is dat je voordat je experimenten uitvoert al kan nagaan welke invloed een verandering van één van bovenstaande omstandigheden heeft op bijvoorbeeld de koeltijd, het vochtverlies of de kroktheid van de korst.

Het omgaan met de natuurkunde, met de wiskunde en met een computer heeft bij dit onderzoek dus een belangrijker rol gespeeld dan het uitvoeren van proeven. Om de draad van het onderzoek te kunnen volgen is het nodig die natuurkundige beschrijving allereerst te behandelen. Vervolgens zullen we met een grote boog om de wiskunde en de computertoepassing lopen. Tenslotte geven we van een aantal proeven de resultaten.



Het transport van warmte in het brood verloopt volgens andere regels dan de afvoer van warmte in de lucht.

Belangrijkste factoren bij het koelen van brood

Als we de snelheid waarmee we brood willen afkoelen, willen vergroten, kan dat relatief gemakkelijk door geforceerde ventilatie. Dat zal meestal leiden tot een minder krokante korst. Ook koelen met koudere lucht levert een aantrekkelijke besparing in tijd op, overigens ook met als gevolg een sloffere korst. De relatieve vochtigheid van de omgeving

heeft slechts weinig invloed op de koeltijd. Ze heeft wel invloed op het vochtverlies. De korst wordt krokanter naarmate de relatieve vochtigheid van de lucht lager is. Ook de luchtigheid van brood is een belangrijke factor bij het bepalen van de koeltijd. De koeltijd wordt korter naarmate het brood luchtiger is.

Het brood komt uit de oven

Als het brood gebakken is halen we in feite een pakketje stoom van ruim 4 liter uit de oven. Let wel, dat beeld is juist als we naar het volume kijken. Het totale volume van een heel brood is ruim 4 liter. De "vaste stof" van het brood heeft een volume van ca. 0,65 liter. De rest, dus ca. 3,5 l., is gasvorming. Omdat het binnenste van het brood tijdens het bakken tot 100°C is verwarmd, heeft de tijdens het bakken gevormde stoom alle andere gassen die in het deeg aanwezig waren, verdreven. Het is voor ons doel een bruikbaar beeld: brood dat uit de oven komt is een pakketje stoom, bij elkaar gehouden door korst en kruim.

De temperatuur in het brood is dus 100°C. De temperatuur van de korst is aan het einde van het bakken hoger. Afhankelijk van het type brood varieert dat van ca. 170°C tot meer dan 200°C. Tijdens het koelen van het brood zal allereerst de korst afkoelen tot 100°C. Dat gebeurt door stroming van de koude omgevingslucht langs de korst. Daarnaast zal de korst ook in temperatuur dalen door uitstraling van warmte. De temperatuur van de korst daalt, die van de lucht rondom het brood stijgt. Zodra de temperatuur van de korst onder 100°C daalt gebeurt er iets bijzonders.

Om het verdere koelproces duidelijk te maken willen we dat, wat in het brood gebeurt, en dat wat in de lucht gebeurt, apart beschrijven. Uiteraard hebben die twee heel veel met elkaar te maken, alleen voor de duidelijkheid willen we dit onderscheid maken.

In het brood

Zoals we al eerder gezien hebben is de kruim als het brood uit de oven komt 100°C. Als de temperatuur van de broodkorst lager dan 100°C wordt, is de korst dus kouder dan de kruim. Dat zal zo het gehele koelproces blijven. Er zal daardoor warmte vanuit de kruim naar de korst stromen. Die warmtestroom wordt gevoerd door twee natuurkundige verschijnselen.

Verreweg het belangrijkste deel van de warmtestroom wordt veroorzaakt door stroming van waterdamp (stoom dus. Meestal spreken we van stoom bij een temperatuur van 100°C of hoger en van waterdamp bij een lagere temperatuur. Maar in wezen is het hetzelfde) en de daarbij behorende condensatie en verdamping.

Zoals we al vermeld hebben bestaat de atmosfeer in het brood direct na het bakken uit stoom. Als de temperatuur van de korst onder 100°C daalt, kan de atmosfeer daarin niet meer volledig uit waterdamp bestaan. Waterdamp condenseert in de korst (hoeveel dat is, hangt af van de temperatuur van de korst). De condensatie van waterdamp gaat gepaard met een grote volumevermindering. De ruimte die zo ontstaat wordt ingenomen door de omringende lucht. Daardoor ontstaat er een verschil in concentratie van waterdamp in de korst en in de kruim. In de korst is deze lager dan in de kruim. Als gevolg hiervan stroomt waterdamp vanuit de kruim naar de korst door zogenaamde diffusie. Diffusie vindt altijd plaats bij concentratieverschillen.

Waterdamp wordt zo aan de kruim onttrokken. Daardoor wordt het mogelijk dat er water uit de kruim verdampt om de naar de korst gestroomde waterdamp te vervangen. Voor het verdampen van dat water is veel warmte nodig. Hierdoor daalt ook de temperatuur in de kruim.

Het klinkt ingewikkelder dan het is. In feite gebeuren deze verschijnselen altijd als er temperatuurverschillen in een ruimte zijn. Vocht condenseert op de koudste plek (de korst) en onttrekt dat aan warmere gedeelten (de kruim), het zogenaamde principe van Watt. U kunt het vergelijken met het uitdrogen van produkten in een diepvries. Daar is de verdamper de koudste plek en zijn de produkten relatief warm.

Door dit principe van Watt neemt het vochtgehalte van de kruim tijdens het koelen af. Het principe van Watt of, wat hetzelfde is, het condensatie/verdampingsmechanisme, speelt vooral een belangrijke rol als produkten luchtig zijn. Voor dit mechanisme is het namelijk belangrijk dat waterdamp door de kruim kan stromen. Andere luchtige produkten, waarin dit mechanisme een overheersende rol speelt, zijn snijkoek, cake, korst, getoerd gerezen. Maar in roggebrood, banketspijs en gele-room is de verplaatsing van water tijdens het koelen veel minder belangrijk. Die produkten koelen dan ook veel langzamer af.

Het zal duidelijk zijn dat de verplaatsing van waterdamp naar de korst zal voortduren zolang er temperatuurverschillen in het brood zijn. Zodra de kruim dezelfde temperatuur heeft als de korst stopt het vochttransport. In de praktijk betekent dit dat het brood is afgekoeld.

Zoals al is vermeld is dit in tarwebrood veruit het belangrijkste mechanisme bij het koelen. Daarnaast speelt ook geleiding van warmte nog een rol. Door temperatuurverschillen tussen korst en kruim verplaatst de warmte zich door geleiding naar de korst. De rol van geleiding wordt groter naarmate het brood minder luchtig is en als het koelen langer duurt. In roggebrood zal geleiding van warmte een belangrijk mechanisme van warmtetransport zijn (niet luchtig, grote afmetingen), in luxe kleinbrood zal het mechanisme van warmtetransport vooral het principe van Watt zijn (luchtig, kleine afmetingen).

In de lucht

We hebben nu gezien welke processen in het brood bij het koelen een rol spelen. De warmte moet uiteindelijk door de lucht worden afgevoerd en daarbij spelen drie processen een rol.

In de eerste plaats gebeurt dat door convectie of luchtstroming. Dat is door afgifte van warmte uit de korst aan de lucht. De lucht rond het brood wordt daardoor warmer. Als vuistregel geldt dat de afvoer van warmte toeneemt naarmate de luchtsnelheid toeneemt. In stilstaande lucht is de warmtestroom door convectie gering, bij gebruik van ventilatoren neemt ze toe.

Een, wat we noemen, geforceerde luchtstroom heeft nog een neveneffect dat grote invloed heeft op het koelproces. Naarmate een hogere luchtsnelheid wordt gebruikt, neemt de

Hoeveel warmte moet aan brood worden onttrokken?

De vraag die we hier willen beantwoorden is hoeveel warmte, uitgedrukt in kJ (kiloJoule), moet worden afgevoerd om brood af te koelen tot bakkerijtemperatuur. Voor het gemak gaan we uit van 1 kg witbrood. Voor andere gewichten en broodsoorten is dit gemakkelijk te herleiden.

Een kilogram witbrood bestaat globaal uit 0,8 kg kruim en ca. 0,2 kg (droge) korst. De soortelijke warmte van kruim van witbrood ligt in de buurt van 2,7 kJ/kg °C, de soortelijke warmte van de korst stellen we op 1,3 kJ/kg °C. De kruim koelen we af van 100 tot 30°C, de korst van 175 tot 30°C. Zo komen we tot de volgende berekening:

kruim	$0,8 \times 2,7 \times 70 =$	151
korst	$0,2 \times 1,3 \times 145 =$	38
		—
totaal		189 kJ/kg witbrood

Globaal geldt dit ook voor andere soorten brood dan witbrood. Bij het koelen van een heel witbrood van 800 g moet dus ca. 150 kJ warmte worden onttrokken.

De soortelijke warmte van brood varieert enigszins met het vochtgehalte. De soortelijke warmte van witbrood is daarom het laagst. Die van Allinsonbrood is met ongeveer 2,9 kJ/kg °C het hoogste.

korsttemperatuur sneller af. Je zou kunnen zeggen dat het bij een hoge luchtsnelheid meer moeite kost de warmte vanuit de kruim naar de korst te transporteren dan het afvoeren van warmte door de lucht. We zeggen dan wel dat de weerstand in het warmtetransport wordt bepaald door het brood en niet door de lucht. Een verdere verhoging van de luchtsnelheid heeft dan slechts weinig invloed op de koelsnelheid.

Een tweede proces dat zorgt voor de afvoer van warmte door de lucht is het verdampen van water. Tijdens het afkoelen van brood neemt het gewicht van brood nog aanzienlijk af. Je kunt uitrekenen dat als er 1 gram water per kg brood verdampt de temperatuur daardoor ca. 1°C daalt. Door weging van het brood direct uit de oven en na het afkoelen kan iedereen gemakkelijk nagaan welke bijdrage dit verdampen van vocht heeft aan het koelproces.

Hoeveel water er kan verdampen hangt van verschillende niet zo voor de hand liggende factoren af. Voor de hand ligt dat de relatieve vochtigheid (r.v.) daarbij een belangrijke rol speelt. De invloed daarvan is, zeker aan het begin van het koelen, niet zo groot. Dan is n.l. de korsttemperatuur hoog en zal de lucht die langs het brood strijkt sterk in temperatuur stijgen. In onderstaand tabelletje hebben we voor verschillende temperaturen aangegeven hoeveel gram waterdamp 1 m³ lucht maximaal kan bevatten.

t °C	g waterdamp per m ³ lucht
30	30
40	51
50	83
60	130
70	198
80	293

Als we koelen met lucht van 30°C bevat 1 m³ bij een r.v. van 100% 30 g waterdamp. Stel dat aan het begin van het koelen lucht langs het brood wordt opgewarmd tot 60°C, dan kan die lucht maximaal 130 g waterdamp per m³ bevatten, 100 g meer

dan bij 30°C. Het zal duidelijk zijn dat de oorspronkelijke r.v. bij 30°C er dan niet zoveel toe doet. Het wordt uiteraard anders in het verdere verloop van het koelproces, als de lucht nog slechts weinig wordt opgewarmd.

Een ander niet zo voor de hand liggend effect op het verdampen van vocht vinden we als we de luchtsnelheid opvoeren. Uiteraard wordt dan de snelheid waarmee het vocht uit de korst verdampt groter. Men moet daarbij wel bedenken dat, zoals we al gezien hebben, de korsttemperatuur sneller lager wordt. Het blijkt dat al met al bij toenemende luchtsnelheid de bijdrage van convectie aan de koeling toeneemt ten koste van het verdampen. Hoe hoger de luchtsnelheid des te lager het vochtverlies. Het effect hiervan is goed zichtbaar in de figuren 5 t/m 8.

Een derde proces dat een rol speelt bij het koelen is straling. Door straling geeft brood dat uit de oven komt warmte af aan de omgeving. De afgifte van warmte door straling vindt plaats als er een temperatuursverschil is tussen het brood en zijn omgeving. Op grond van de hier gegeven temperatuurverschillen en de zogenaamde emissiecoëfficiënt voor een broodkorst kunnen we berekenen dat straling nog een aanzienlijke bijdrage levert aan de koeling.

Experimenten

Tot slot willen we hieronder nog de resultaten van een aantal experimenten beschrijven die we hebben uitgevoerd. De eerste drie series koelproeven hebben we uitgevoerd met heel witbrood en de vierde serie met heel volkorenbrood. Daarbij hebben we de temperatuur van de lucht, de luchtsnelheid en de relatieve vochtigheid gevarieerd.

Wat betreft het brood hebben we gekeken naar het verloop van de kerntemperatuur en het gewichtsverlies tijdens het koelen. We hebben ook getracht het vochtgehalte van de korst te meten, maar die meting geeft niet meer dan een indruk van de veranderingen in het vochtgehalte en niet het juiste gehalte. Uiteraard hebben we ook de afgekoelde broden beoordeeld, met name de korstgeaardheid. We hebben ook gekeken naar de snijbaarheid van het brood. Die is echter van nog zoveel andere factoren afhankelijk, zoals de aard van de kruim en de samenhang daarin, dat we die resultaten hier achterwege laten.

Vacuüm koelen

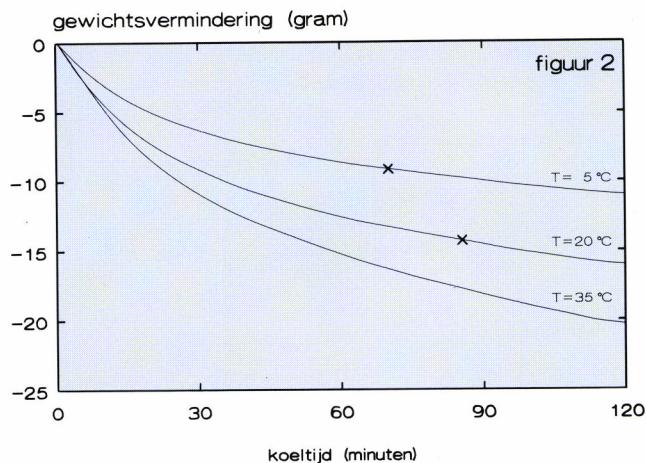
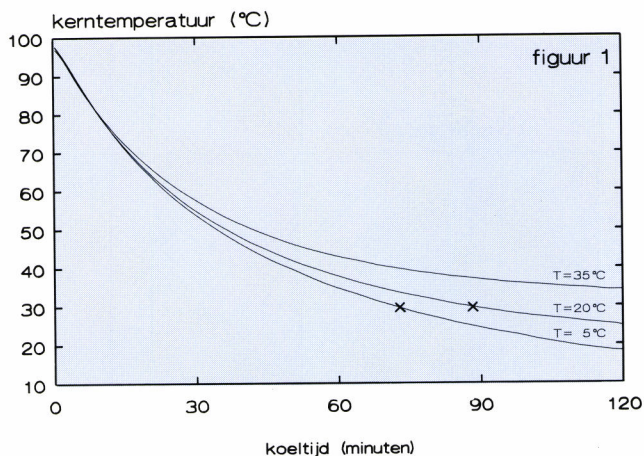
In de jaren '60 heeft de Engelse firma Tweedy een zeer elegante, maar nog weinig toegepaste methode van broodkoeling ontwikkeld. Direct na het bakken wordt het brood in een kamer geplaatst die luchtledig wordt gezogen. Daardoor wordt ook de waterdamp in het brood weggezogen. Er gebeurt echter meer. Het kookpunt van water is afhankelijk van de druk. Door de drukverlaging blijft water uit de kruim verdampen, waardoor deze afkoelt. Dat gaat door tot de kruim geheel is afgekoeld, althans als de onderdruk voldoende laag is. De snelheid van koelen is hier dus volledig afhankelijk van de capaciteit van de vacuümpomp. In principe kan het brood in enkele seconden gekoeld worden.

Alle warmte wordt dus onttrokken door het mechanisme van

verdampen. Condensatie vindt plaats in de vacuümpomp. En niet, zoals bij de gangbare manier van koeling, in de broodkorst. Daardoor blijft bij vacuümkoeling de korst de krokantheid behouden die het aan het einde van het bakken had.

Omdat de korst droog is, kan daaraan op deze wijze geen warmte worden onttrokken. Bij deze manier van koelen blijft de korst dus ook warm. We hebben al gezien dat de warmte-inhoud van de korst echter zeer gering is. Het warm blijven van de korst is dus niet zo bezwaarlijk.

De reden dat deze methode weinig wordt toegepast ligt vooral in de hoge investerings- en exploitatiekosten. Er zijn ook aanwijzingen dat een deel van het broodaroma bij deze manier van koelen verloren gaat.

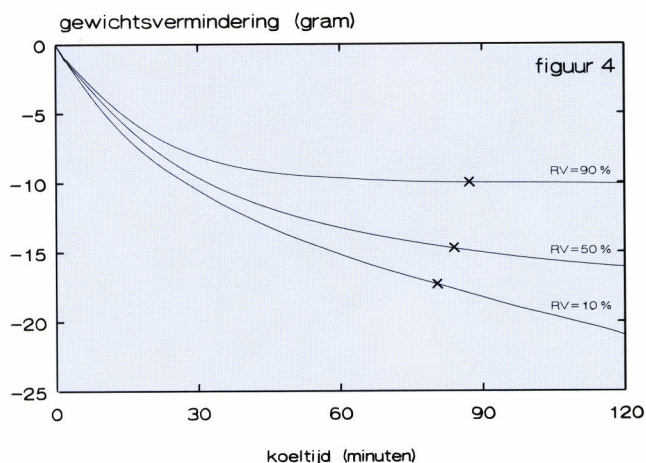
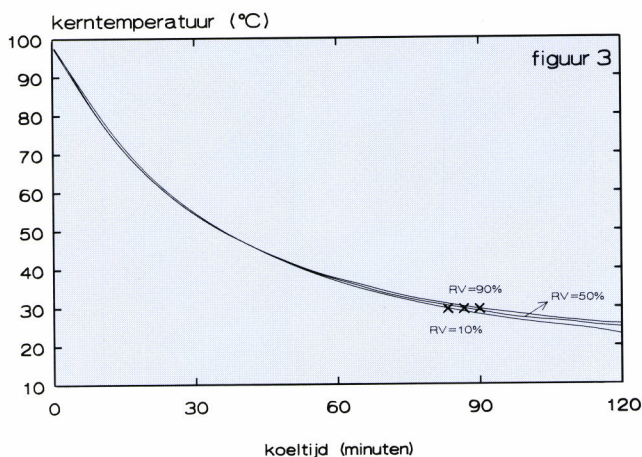


Kerntemperatuur en gewichtsvermindering van een heel witbrood bij het afkoelen met verschillende temperaturen van de lucht; luchtsnelheid 0,5 m/s, r.v. 50%.

Involed van de luchttemperatuur op de koelsnelheid

Deze proeven met witbrood zijn uitgevoerd met drie luchttemperaturen nl. 5°C, 20°C en 35°C. In alle gevallen werd lucht gebruikt met een relatieve vochtigheid van 50% en met een snelheid van 0,5 meter per seconde. Het resultaat ziet u in figuur 1. Het afkoelen tot een kerntemperatuur van 40°C duurde 49, 54 en 71 minuten bij een luchttemperatuur van respectievelijk 5, 20 en 35°C. Als we verder willen koelen dan een kerntemperatuur van 40°C, bijvoorbeeld tot 30°C, dan duurde dat onder de hier gegeven omstandigheden 71 minuten (bij 5°C) en 86 minuten (bij 20°C). Met lucht van 35°C kunnen we brood uiteraard niet tot 30°C koelen. De kruisjes in de figuren geven de situatie aan bij het bereiken van een kerntemperatuur van 30°C. In figuur 2 is de verandering van het broodgewicht gegeven onder de verschillende omstandigheden van de proef. Het ge-

wichtsverlies door verdamping van vocht varieerde sterk met de luchttemperatuur. Als we tot 40°C koelden, was het gewichtsverlies met lucht van 5°C 8 gram, van 20°C 12 gram en met lucht van 35°C 16 gram. Het vochtverlies werd dus kleiner naarmate met een lagere luchttemperatuur gekoeld werd. Het ligt dus voor de hand dat de korst van het bij 5°C gekoelde brood wat sloffer was dan die bij 35°C. Dat was goed meetbaar en ook goed merkbaar. Bij het beoordelen van de korst aan het einde van het koelen gaven we duidelijk de voorkeur aan het brood dat bij 35°C gekoeld was. Dat brood was wat steviger waardoor het zijn vorm beter behoudt. We moeten wel bedenken dat bij het verder opslaan van het brood onder die condities het gewichtsverlies blijft aanhouden. Dat kan op den duur wel aanleiding geven tot klachten over een te sterk ingedroogd brood.



Kerntemperatuur en gewichtsvermindering van een heel witbrood bij het afkoelen met verschillende relatieve vochtigheden; temperatuur van de lucht 20°C, luchtsnelheid 0,5 m/s.

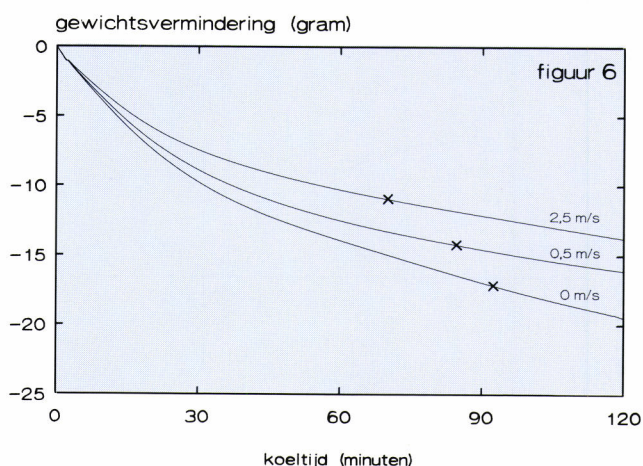
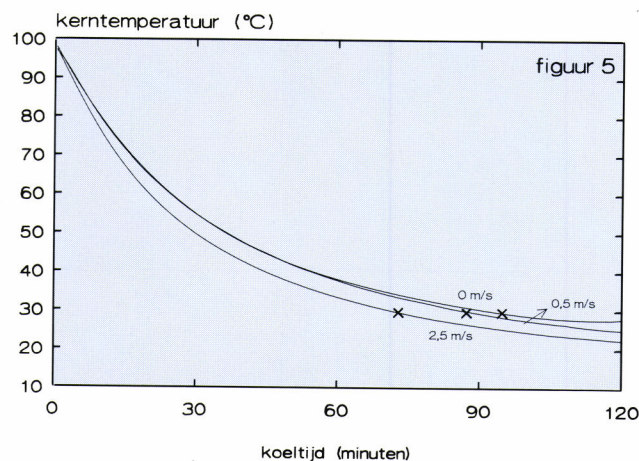
Involed van de relatieve vochtigheid

Met een luchttemperatuur van 20°C hebben we ook proeven met witbrood gedaan, bij verschillende luchtvochtigheden. Gekozen is voor een r.v. van 10, van 50 en van 90%. Gelijik aan de vorige proeven was de luchtsnelheid 0,5 meter per seconde. In figuur 3 is weergegeven hoe dan de kerntemperatuur verandert. De verschillen tussen de drie experimenten waren erg klein. Een kerntemperatuur van 40°C werd bereikt na 53-54 minuten koelen. De verschillen werden wat groter als tot een kerntemperatuur van 30°C werd gekoeld. Ze varieerde van 82 tot 88 minuten. Al met al bleven de verschillen zeer gering. De r.v. van de lucht heeft kennelijk zeer weinig invloed op de koel-

snelheid. De invloed op het vochtverlies en dus op de krokantheid van de korst was wat groter. In figuur 4 is te zien dat de verschillen in vochtverlies tot een kerntemperatuur van ca. 50°C tamelijk klein waren. Dat was op grond van het model ook te verwachten. Daarna werden ze groter. Tot een kerntemperatuur van 30°C waren de vochtverliezen tijdens het koelen 10, 14 en 17 gram per heel brood bij een r.v. van respectievelijk 90, 50 en 10%. Die verschillen in vochtverlies waren ook waarneembaar aan de korst van het brood. De korst van brood gekoeld bij een r.v. van 10% was duidelijk krokanter dan de overige twee. En dat brood werd daarom ook wat hoger gewaardeerd. De krokantere korst is ook verantwoordelijk voor een

prettige korstgeur. Maar zoals bij de vorige proef is ook zichtbaar dat bij een r.v. van 10% de snelheid van uitdroging (ca. 1 g per 10 minuten) bij verder bewaren vrij hoog blijft. Men moet

het brood dus niet te lang onder die omstandigheden laten staan.



Kerntemperatuur en gewichtsvermindering van een heel witbrood bij het afkoelen met verschillende luchtsnelheden; temperatuur van de lucht 20°C, r.v. 50%.

Invloed van de luchtsnelheid

Bij deze proeven met witbrood hebben we de luchtsnelheid gevarieerd en hebben we de temperatuur van de lucht en de relatieve vochtigheid constant gehouden, namelijk 20°C en 50% respectievelijk. De luchtsnelheid bij de proeven was 0, 0,5 en 2,5 m/s. Er is een groot verschil in koeltijd tot een kerntemperatuur van 30°C bij verschillende luchtsnelheden. Ze varieerde van 92 minuten bij stilstaande lucht via 86 minuten bij 0,5 m/s tot 71 minuten bij 2,5 m/s. Door het geforceerd koelen kunnen we in koeltijd besparen.

In figuur 6 is de gewichtsvermindering weergegeven. Die liep van 17 g bij een luchtsnelheid van 0 m/s tot 11 g bij een luchtsnelheid van 2,5 m/s als tot een kerntemperatuur van 30°C

werd gekoeld. Het gewichtsverlies werd dus kleiner naarmate de snelheid van de lucht toenam. Hier is sprake van het effect dat in dit bulletin is beschreven: bij geforceerd koelen daalt de korsttemperatuur sneller dan bij rustige koeling. Daardoor condenseert meer waterdamp in de korst. Bij rustige koeling wordt meer waterdamp via de lucht afgevoerd. Hoe hoger de luchtsnelheid des te groter het aandeel van convectie in de koeling en dus te kleiner het aandeel van verdampen.

Uiteraard was dit ook weer merkbaar in de eigenschappen van de korst: ze was tamelijk krokant na afkoelen zonder luchtcirculatie, ze was tamelijk slof nadat wel met stromende lucht was gekoeld.

Het bewaren van brood

Brood wordt bij het bewaren snel oudbakken. Alleen bij het bewaren in de diepvries blijven de oorspronkelijke eigenschappen redelijk goed behouden. Onder gangbare omstandigheden wordt de broodkruim langzaam maar zeker stug en kruimelig, wordt de korst slof en gaat de typerende geur van vers brood verloren.

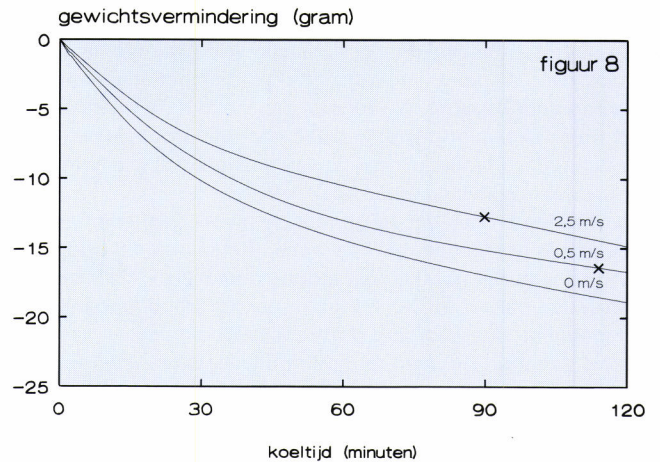
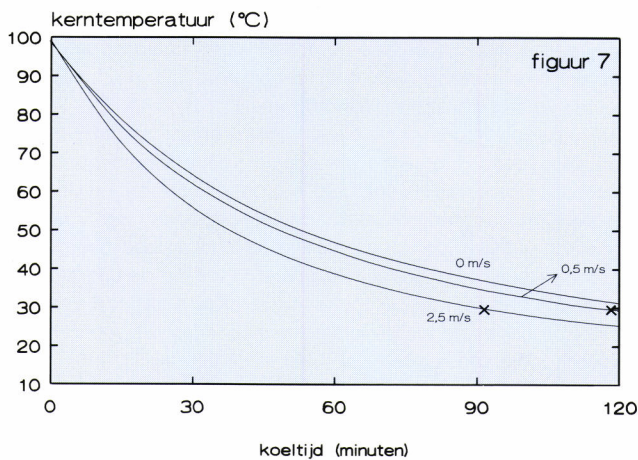
Die veranderingen gaan het snelst bij een temperatuur rond het vriespunt. Naarmate de temperatuur bij het bewaren hoger gekozen wordt neemt de snelheid van oudbakken worden af. Dat is de reden dat in de meeste bakkerijen het broodmagazijn in de winter goed verwarmd wordt.

In 1917 heeft Dr. Katz zijn onderzoek gerapporteerd naar de arbeidsomstandigheden van Amsterdamse bakkers. Om de nachtarbeid te verminderen stelde hij voor brood te bewaren in kasten bij 60°C en een geschikte relatieve vochtigheid. Bij

die temperatuur gaat de malsheid van brood nauwelijks achteruit. Deze denkbeelden van Katz hebben de praktijk niet of nauwelijks gehaald.

Ook bij 30°C is de snelheid van oudbakken worden klein in vergelijking met 0°C. Het is daarom aantrekkelijk het brood bij die temperatuur te bewaren. Langer dan 12 uur bij die temperatuur bewaren is niet raadzaam, daar dan rekening gehouden moet worden met de vorming van leng of schimmel.

Wat betreft de hoedanigheid van de korst kunnen we bij bewaren kiezen uit twee kwaden: bij verpakt brood wordt de korst snel slof, bij onverpakt brood droogt het brood langzaam maar zeker uit. Eigenlijk wensen we tijdens het bewaren een gecontroleerde uitdroging van het brood, waarbij de korst zo lang mogelijk zijn krokantheid behoudt. Door brood in papier te verpakken wordt dat min of meer bereikt.



Kerntemperatuur en gewichtsvermindering van een heel volkorenbrood bij het afkoelen met verschillende luchtsnelheden; temperatuur van de lucht 20°C, r.v. 50%.

Dezelfde proeven hebben we herhaald met volkorenbrood. De resultaten daarvan zijn te zien in figuur 7 en 8. Het afkoelen van volkorenbrood tot een kerntemperatuur van 30°C duurde veel langer dan het afkoelen van witbrood, namelijk meer dan 120 minuten bij een luchtsnelheid van 0 m/s, 114 minuten bij 0,5 m/s en 90 minuten bij 2,5 m/s.

Hier zien we het al eerder beschreven effect van de invloed van het volume op de snelheid van koelen. Het wittebrood had een volume van ca. 4,5 l (gewicht uit de oven 800 g), het volkorenbrood had een volume van 3,2 l (gewicht was ca. 830 g). Het volkorenbrood was dus duidelijk minder luchtig. De bijdrage van het condensatie/verdamingsmechanisme aan het afkoelen was daardoor kleiner bij het volkorenbrood dan bij het wittebrood. En afkoelen door geleiding gaat nu eenmaal wat trager.

De gewichtsvermindering bij het afkoelen was ook weer afhankelijk van de luchtsnelheid. Ze was het kleinst (13 g) als geforceerd werd gekoeld. Bij rustige koeling was het gewichtsverlies 19 g als tot een kerntemperatuur van 30°C werd gekoeld.

Ook bij deze proef was de korst van het brood aan het eind van de koeling wat krokanter bij de rustige koeling in vergelijking met geforceerde koeling. Ook daarbij moet men bedenken dat het brood bij verder bewaren in een geventileerde ruimte sneller uitdroogt dan in een ruimte zonder ventilatie. Dat kan uiteindelijk wel leiden tot te sterk ingedroogd brood. Hoe snel brood bij bewaren uitdroogt, hangt af van de luchttemperatuur, de luchtsnelheid, de r.v. van de lucht en ook van de luchtigheid van het brood.

De bijdrage van verdampen en van convectie aan de koeling

Uit het gewichtsverlies van het brood tijdens het koelen kunnen we op een eenvoudige manier de bijdrage van het verdampen en van convectie aan die koeling berekenen. Als alle warmte door convectie zou worden afgevoerd, zou het gewicht van het brood niet afnemen. Dit is het ene uiterste. Het andere uiterste is dat alle warmte door verdampen wordt afgevoerd. Uit de soortelijke warmte van brood en de verdampingswarmte berekenen we dat voor het afkoelen van 1 kg brood tot 30°C ongeveer 80 g water moet worden

verdampt. In een heel brood is dat dus ongeveer 65 g. Als een heel brood tijdens het koelen 20 g lichter wordt betekent dit dat de bijdrage van verdamping ongeveer 30% is en die van convectie ca. 70%

Het hier gegeven voorbeeld is een tamelijk reëel voorbeeld. In de praktijk is de bijdrage van convectie meestal iets groter dan die van verdampen. Alleen convectie komt praktisch niet voor, koelen door alleen verdampen van water gebeurt in de hier al behandelde vacuüm-koelmethode van Tweedy. Dan neemt het gewicht van brood dus met ongeveer 8% af.

TNO-Voeding, Afdeling IGMB doet technologisch onderzoek op het gebied van de bakkerij. Het hier beschreven onderzoek is onderdeel van het onderzoekproject "Oventechnologie". Doel van het project is de processen die bij bakken en afkoelen van producten een rol spelen beter in kaart te brengen. De afdeling adviseert bedrijven bij het toepassen van deze technologie.

Inlichting:
TNO-Voeding, Afdeling IGMB
Postbus 15
6700 AA WAGENINGEN
Telefoon: 08370-99227
Telefax: 08370-21221