

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

Referentienummer 91-312
Dossiernummer 112325-22223
Datum augustus 1991
NP

Auteur
Ir. C.E. Krist-Spit

Met medewerking van
W.F. Sulilatu

Trefwoorden
– oventechnologie
– warmteoverdracht
– bakprodukten

Bestemd voor
Instituut voor Voedingsmiddelen Technologie
afdeling IGMB
t.a.v. Dr. Ir. P. Verlaan
Postbus 15
6700 AA Wageningen

Uitgevoerd in kader van Oventechnologieproject 1990

Samenvatting

In samenwerking met IGMB-TNO is in het kader van het oventechnologieproject 1990 experimenteel onderzoek verricht naar de procescondities in de bakruimte van een bakoven gedurende het bakken van biscuit, ontbijtkoek en brood. De doelstelling van het onderzoek is het bepalen van de uiterste condities in de bakruimte, waarbij een produkt van goede kwaliteit geproduceerd kan worden. Daartoe zijn met name de mate van convectorie in de bakruimte, het vochtgehalte van de ovenatmosfeer en de baktemperaturen gevarieerd. Uitgangspunt daarbij was, dat de kleur per produkt constant gehouden is. Door IGMB zijn kwaliteitsbepalingen van de gebakken produkten verricht.

Er is een weegplateau ontwikkeld, waarmee gedurende het bakken continu het produktgewicht gemeten kan worden.

Uit de gemeten temperaturen op en in de produkten en in de bakruimte zijn de stralingsoverdracht en de convectorieve warmteoverdracht naar de produkten berekend. De hieruit berekende totale overgedragen warmte week tussen 0% en 50% af van de uit de opwarming van het produkt en het gemeten inbakverlies berekende overgedragen warmte.

Gebleken is, dat produkten van goede kwaliteit (gaar, voldoende volume en goede vorm, acceptabel inbakverlies) met overeenkomende kleur gebakken kunnen worden onder uiteenlopende ovencondities. Hierbij liepen de aandelen straling en convectorie uiteen van overwegend straling (tot 82%) tot overwegend convectorie (tot 60%). Het type warmteoverdracht bleek nauwelijks van invloed op de grote lijnen van de produktkwaliteit.

Bij biscuit varieerde de ovenluchttemperatuur tussen 180 °C met convectorie (1.3 m/s) tot 225 °C zonder convectorie. Het gemiddelde dauwpunt varieerde van circa 20 °C tot 80 °C en bleek niet van invloed op de grote lijnen van de produktkwaliteit.

Bij ontbijtkoek varieerde de ovenluchttemperatuur tussen 180 °C met convectorie en 200 °C zonder convectorie en het dauwpunt tussen circa 20 en 87 °C. Bij de proeven met hoog dauwpunt bleek het inbakverlies zowel met als zonder convectorie 10 tot 30% lager te liggen dan bij laag dauwpunt. Dit is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan het optreden van condensatie op het produktoppervlak gedurende de proeven met hoog dauwpunt, waardoor de verdamping pas later op gang komt.

Bij brood varieerde de ovenluchttemperatuur met en zonder convectorie weinig (tussen 200 en 215 °C) bij temperatuurinstellingen van de kruin- en vloer elementen van respectievelijk 210/230 °C met convectorie en 230/260 °C zonder convectorie. Het dauwpunt varieerde van 40 °C tot 90 °C, omdat er aan het begin van de proeven telkens kort gestoomd is. Het inbakverlies bleek met convectorie circa 25% hoger te liggen dan zonder convectorie.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

De ovencondities waartussen op basis van het uitgangspunt van gelijke kleur per produkt is gevarieerd mogen niet als 'uiterste condities waarbij een produkt met minimum kwaliteit ontstaat' beschouwd worden, omdat de gevonden variatie in de produktkwaliteit zeer klein was.

Hoewel niet hard te maken gezien de matige nauwkeurigheid van de berekeningsresultaten van de warmteoverdracht lijkt het uitgangspunt van gelijke kleur geleid te hebben tot het creëren van ovencondities waarbij de totale overgedragen warmte naar het produkt min of meer constant gebleven is. Het feit, dat tevens blijkt dat er weinig variatie optreedt in kwaliteitskenmerken, leidt tot de volgende hypothesen:

- a. voor de grote lijnen van de kwaliteit, dat wil zeggen goede gaarheid, kleur, volume en vorm en acceptabel inbakverlies, is de totale overgedragen warmte bepalend, ongeacht het type warmteoverdracht en het vochtgehalte van de ovenatmosfeer, mits een zeker minimum aandeel straling aanwezig is.
- b. beheersing van de totale overgedragen warmte leidt tot beheersing van het inbakverlies.

Aanbevolen wordt door gericht experimenteel- en modelonderzoek deze hypothesen voor verschillende typen produkten te verifiëren. Tevens wordt aanbevolen de mogelijkheden te onderzoeken om te komen tot energie-efficiënte sturing tijdens het bakproces van de totale overgedragen warmte op basis van het (gemiddelde) vochtgehalte in het produkt (bepaalt de hoofdlijnen van de kwaliteit).

Overwogen kan worden daarnaast een 'fijnregeling' te ontwikkelen voor optimalisatie van de per produkt belangrijkste geachte kwaliteitskenmerken (nuancering van de kwaliteit).

Symbolenlijst

A	oppervlakte	(m ²)
C_p	soortelijke warmte	(kJ/kgK)
D_h	hydraulische diameter ($\equiv 4 \cdot \text{omtrek/oppervlak}$)	(m)
F_{1-2}	zichthoek voor stralingsoverdracht van oppervlak 1 naar oppervlak 2	
g	zwaartekrachtversnelling	(m/s ²)
$K_{(i)^2}$	$\equiv A_i F_{i-i'}$	
L	karakteristieke lengte voor grenslaag opbouw	(m)
m	massa	(kg)
Δm	inbakverlies	(kg)
Q	opgenomen warmte	(W)
T	temperatuur	(°C)
v	snelheid	(m/s)
w	vochtgehalte	(kg water/kg deeg)
α	warmteoverdrachtcoëfficiënt	(W/m ² K)
β	uitzettingscoëfficiënt	($\sim 1/T$; T in K)
ε	emissiecoëfficiënt	
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	(W/mK)
ν	kinematische viscositeit	(m ² s)
σ	constante van Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \text{W/m}^2\text{K}^4$	

Kengetallen

Gr_L	Grashofgetal	($\equiv \beta g L^3 \Delta T / \nu^2$)
Nu_L	Nusseltgetal	($\equiv \alpha L / \lambda$)
Pr	Prandtl-getal	
Re_L	Reynoldsgetal	($\equiv \nu L / \nu$)

Indices

b	bakplaat, bakblik, bakvorm
c	convectie
do	deeg aan begin van de bakproef
e	aan eind van de bakproef
k	van de kruinelementen
o	van de ovenlucht
p	van produktoppervlak
v	van de vloei-elementen
w	van de bakruimte-wanden

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
	Symbolenlijst	4
1	Inleiding	6
2	Meetprogramma	7
2.1	Beschrijving van de oven	7
2.2	De bakprodukten.....	7
2.3	De verschillende bakcondities per produkt.....	8
2.4	Metingen tijdens de bakproef	9
2.5	De toegepaste meetmethoden	10
2.6	Kwaliteitsbepaling van de produkten	11
3	Resultaten en discussie.....	12
3.1	Biscuit.....	12
3.1.1	Temperatuurverloop tijdens het bakken	12
3.1.2	Inbakverlies en verdampingssnelheid	13
3.1.3	Resultaten warmteoverdrachtsberekeningen	14
3.2	Ontbijtkoek	15
3.2.1	Temperatuurverloop tijdens het bakken	15
3.2.2	Inbakverlies en verdampingssnelheid	16
3.2.3	Resultaten warmteoverdrachtsberekeningen	17
3.2.4	Overige kwaliteitskenmerken.....	17
3.3	Brood	18
3.3.1	Temperatuurverloop tijdens het bakken	18
3.3.2	Inbakverlies en verdampingssnelheid	18
3.3.3	Resultaten warmteoverdrachtsberekeningen.....	19
3.3.4	Broodvolume.....	19
3.4	Enkele overwegingen.....	19
4	Conclusies en aanbevelingen	22
4.1	Conclusies.....	22
4.1.1	Algemene conclusies.....	22
4.1.2	Specifieke conclusies	22
4.2	Aanbevelingen	23
5	Literatuur	25
6	Verantwoording	26

Tabellen 1 tot en met 6

Figuren 1 tot en met 19

Bijlagen 1 tot en met 3

1 Inleiding

In samenwerking met IGMB-TNO is experimenteel onderzoek verricht naar de procescondities in de bakruimte van een bakoven gedurende het bakken van biscuit, ontbijtkoek en brood. De doelstelling van het onderzoek is het bepalen van de uiterste condities in de bakruimte, waarbij een produkt van goede kwaliteit geproduceerd kan worden. Daartoe zijn met name de mate van convector in de bakruimte, het vochtgehalte van de ovenatmosfeer en de baktemperaturen gevarieerd.

Dit project betreft één van de deelprojecten van het oventechnologieproject 1990, dat door IGMB-TNO in opdracht van de NOVEM wordt uitgevoerd. Hierin participeren naast IGMB-TNO enkele ovenbouwers en -gebruikers. De doelstelling van het oventechnologieproject behelst het komen tot betere procesbeheersing en energiebesparing in de brood- en banketsector. Verkregen inzicht in de bak-, kleur- en droogprocessen dient te leiden tot verbeterde ovenontwerpen [1].

De bakproeven zijn uitgevoerd in de proefbakkerij van IGMB-TNO te Wageningen, in de periode van oktober 1990 tot maart 1991. De meetapparatuur is aangebracht in de daar beschikbare Becker oven, die elektrisch gestookt is. De opzet van het meetprogramma en de toegepaste meetmethoden zijn beschreven in hoofdstuk 2. De meetresultaten worden per produkt weergegeven en besproken in hoofdstuk 3. In §3.4 worden enkele overwegingen gepresenteerd, die de basis vormen voor de aanbevelingen. Tenslotte worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan in hoofdstuk 4 van dit rapport.

Waar in dit rapport en in de titels bij figuren en tabellen gesproken wordt van 'v=4' wordt hiermee bedoeld dat de ventilatorstand 4 was. Dit correspondeert met een ongestoorde aanstroomsnelheid van de bakruimte van 1.3 m/s.

2 Meetprogramma

2.1 Beschrijving van de oven

Uitgangspunt voor de keuze van de oven, waarin de bakproeven uitgevoerd zijn, was de aanwezigheid van voldoende mogelijkheden om de procescondities in de bakruimte te variëren. De elektrisch gestookte Becker oven bleek geschikt om het meetprogramma in uit te voeren, figuur 1. De oven bevat één bakruimte van 100 * 70 * 26 cm, waarin de mate van convectie (verticaal van onder naar boven door de bakruimte) gevarieerd kan worden en de temperaturen van kruin- en vloerelementen onafhankelijk van elkaar ingesteld kunnen worden. Tevens is de oven aangesloten op een stoomleiding. De stoom kan via een buis met gaatjes over de lengte van de bakruimte ingebracht worden.

Bij voorbereidende proeven met de oven in onbeladen toestand bleek, dat de convectielucht niet homogeen van onder naar boven door de bakruimte stroomde, maar naar de rechter-achterhoek gezogen werd, zie foto 1 in bijlage 2 (met een rookgenerator is gekeken naar het stromingspatroon). Om dit te verhelpen is onder de bakruimte een geperforeerde plaat geplaatst, waardoor een betere luchtverdeling over de bakruimte is bereikt. Tevens bleek onder andere uit de beelden, die door middel van de infrarood thermograaf van de dichte oven gemaakt zijn, dat de oven op veel plaatsen lekte, onder andere rondom de oven deur, bij de ventilator op het dak en via de wasemgaten. Deze lekkages zijn verholpen. Doordat echter het raam in de linkerzijwand vervangen moest worden door een plaat fermiculiet in verband met de noodzakelijke doorvoeren, was enige lekkage via de doorvoergaten niet te vermijden.

De stoomtoevoer kan geregeld worden door handbediening via een kraan. De aangevoerde stoom stroomt via een condenspot via de kraan in de stoomtoevoerbuis in de bakruimte. Gedurende de proeven met een hoog vochtgehalte in de bakruimte (dauwpunt rond 90 °C) is gebleken, dat toch enig condensaat meegevoerd wordt de oven in. Uiteindelijk is daarom een condensopvanggoot onder de stoombuis aangebracht (het merendeel van de proeven was toen echter reeds uitgevoerd).

De regeling van de oventemperatuur vindt plaats door middel van temperatuuropnemers, die geplaatst zijn tussen respectievelijk de kruin- en vloerelementen. De gewenste kruin- en vloertemperaturen dienen ingesteld te worden, alsmede enkele parameters, die het regelgedrag van de regelaars vastleggen. De elementen kunnen in gedeelten aan- en uitgeschakeld worden; 1/3 van de elementen, goed verdeeld over het kruin/vloeroppervlak, zijn daartoe onderling gekoppeld en de overige 2/3 van de elementen zijn eveneens onderling gekoppeld.

2.2 De bakprodukten

Het uitgangspunt bij de keuze van de produkten was, dat er een verscheidenheid aan typen en gebruikelijke bakcondities diende op te treden. Gekozen is voor biscuit, ontbijtkoek en wit busbrood.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

Hierdoor zijn zowel brood als banket vertegenwoordigd. Brood en ontbijtkoek behoren tot de 'natte' bakkerijprodukten, biscuit behoort tot de 'droge' produkten. De variatie in de baktijd loopt uiteen van 6 minuten voor biscuit tot 45 minuten voor ontbijtkoek. In de praktijk worden deze produkten gebakken bij temperaturen tussen 140 en 270 °C, met of zonder convectie.

De toegepaste receptuur is voor elk van de produkten weergegeven in bijlage 1. Gedurende het meetprogramma zijn receptuur en bereidingswijze niet gevarieerd.

Tijdens de bakproeven met brood zijn telkens twee koppels van drie broden gebakken, begingewicht per brood gemiddeld 850 gram, zie foto 2 in bijlage 2. De ontbijtkoek is gebakken in een bak van 50 * 34 * 6.5 cm, begingewicht 3720 gram, zie foto 3 in bijlage 2. De bakproeven met biscuit zijn uitgevoerd met een bakplaat, waarop 20 biscuits gelegen waren verdeeld over drie rijen; begingewicht van de 20 biscuits gemiddeld 175 gram, zie foto 4 in bijlage 2. De ovenbelading was in alle drie gevallen lager dan maximaal mogelijk zou zijn in deze bakruimte vanwege de nodige ruimte voor de meetapparatuur rondom de produkten. In figuur 2 is de geometrie van de opstelling in de oven weergegeven voor elk van de produkten.

2.3 De verschillende bakcondities per produkt

De volgende procesparameters zijn gevarieerd:

- De convectie in de bakruimte: geen convectie of convectiestand 4.
Convectiestand 4 correspondeert met een ongestoorde luchtsnelheid van 1.3 m/s bij een temperatuur van 200 °C.
- Het vochtgehalte in de bakruimte: 'hoog' of 'laag' dauwpunt.
Omdat het dauwpunt niet geregeld kon worden is door middel van handbediening zo goed mogelijk het gewenste dauwpunt benaderd.
- De temperatuurinstelling van kruin- en vloerelementen.

Er zijn twee belangrijke randvoorwaarden opgelegd aan de uitvoering van de bakproeven:

- De baktijd is per produkt constant gehouden, te weten 6 minuten voor biscuit, 30 minuten voor brood en 45 minuten voor ontbijtkoek.
- De procescondities zijn zodanig gevarieerd, dat onder alle omstandigheden de **bruining** per produkt gelijk was. Om dit te bereiken zijn voorbereidende proeven uitgevoerd door IGMB, waarbij bij gegeven instelling van convectie en dauwpunt telkens de temperatuurinstelling van de kruin- en vloerelementen zodanig is aangepast, dat een constante bruining per produkt verkregen werd. De bruining is bepaald door middel van een kleurmeter, zie hiervoor § 2.6.

Tabel 2.1 geeft per produkt de vier gekozen bakcondities weer.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

Instellingen		Brood		
convectie	met	met	zonder	zonder
dauwpunt (°C)	70	90	70	90
temp. kruin/vloer (°C)	230/210	230/210	230/260	230/260
		Ontbijtkoek		
convectie	met	met	zonder	zonder
dauwpunt (°C)	15	90	15	90
temp. kruin/vloer (°C)	180/180	180/180	200/200	200/200
		Biscuit		
convectie	met	met	zonder	zonder
dauwpunt (°C)	15	90	15	90
temp. kruin/vloer (°C)	180/180	180/180	230/230	230/230

2.4 Metingen tijdens de bakproef

De volgende produktparameters zijn gemeten:

- kerntemperatuur,
- bij ontbijtkoek: de temperatuur in de koek op 5 hoogtes boven de bodem van de bakvorm,
- oppervlaktetemperatuur,
- temperatuur van de onderzijde van het produkt,
- begin- en eindgewicht van het produkt,
- gewichtsafname gedurende de bakproef,
- temperatuur van het bakblik, respectievelijk de bakvorm en bakplaat.

Verder zijn de volgende ovencondities gemeten:

- gastemperatuur van de ovenatmosfeer,
- vochtigheid in de bakruimte,
- temperaturen van alle wanden
- temperaturen van kruin- en vloerelementen: van elk één element uit de 1/3-sectie en één uit de 2/3-sectie (zie § 2.1),
- via puntmeting de luchtsnelheid in de bakruimte,
- de CO₂ concentratie in de bakruimte.

Daarnaast zijn de emissiecoëfficiënten van de produktoppervlakken en de ovenwanden bepaald.

2.5 De toegepaste meetmethoden

Voor alle temperatuurmetingen zijn thermokoppels van het type K (chromel-alumel) toegepast (diameter 1 mm). De thermokoppels op de elementen waren hierop bevestigd door middel van geleidende pasta, afgeschermd met metaal-tape, die zwart gespoten was. Het koppel is enkele centimeters langs het element geleid, om geleidingsverliezen via de thermokoppeldraden zelf te vermijden.

De luchttemperatuur is gemeten met een zuigpyrometer. Het gas wordt via een buis uit de oven gezogen langs een thermokoppel in het hart van de buis. Het thermokoppel is tevens omgeven door een keramisch stralingsscherm. De snelheid van de lucht in de buis bedroeg 3 m/s. Berekend kan worden, dat bij het temperatuurniveau gedurende de bakproeven de fout in de meting van de gastemperatuur ten gevolge van stralingsverlies minder dan 1% is. Derhalve is de nauwkeurigheid van het thermokoppel zelf bepalend voor de nauwkeurigheid van de meting.

Getracht is de produkt oppervlaktetemperatuur tevens te meten door middel van een infrarood temperatuuropnemer. Dit is niet goed gelukt.

De vochtigheid van de ovenatmosfeer is gemeten met een Ultrakust vochtmeter, die reeds op de oven gemonteerd was, zie foto 5 in bijlage 2. Hiermee wordt continu het dauwpunt bepaald.

De CO₂ concentratie is gedurende enkele proeven continu registrerend gemeten door middel van een Riken CO₂ meter (meetprincipe infraroodabsorptie).

De emissiecoëfficiënten zijn bepaald met behulp van een Minolta-Land Cyclops 33 infraroodtemperatuuropnemer. Hierbij wordt de gemeten stralingstemperatuur middels variatie van de op de opnemer ingestelde emissiecoëfficiënt gelijk gemaakt aan de temperatuur van het oppervlak, waarvan de emissiecoëfficiënt bepaald moet worden.

Voor het bepalen van de luchtsnelheid op enkele plaatsen in de oven is gebruik gemaakt van een zeer gevoelige RVS vleugelradanemometer van het merk Höntzsch. Deze anemometer is bestand tegen temperaturen tot 370 °C (continu verblijf) en heeft een aanspreekgevoeligheid van 0.2 m/s. De diameter van de anemometer is 30 mm. Het verplaatsen van de anemometer tijdens de proeven bleek niet mogelijk zonder de condities op het produkt teveel te verstoren. Ondanks dat er een aantal extra proeven uitgevoerd zijn voor het bepalen van het luchtsnelheidspatroon in de beladen oven is dit onvoldoende gelukt.

Tenslotte is de gewichtsafname als functie van de baktijd bepaald door middel van een weegplateau, dat met ieder van de uiteinden op een elektronische balans, merk Mettler, rustte. Teneinde de wrijving in het weegsysteem tot een minimum te beperken is gewerkt met een open doorvoersleuven door de beide zijwanden van de oven, waardoor de uiteinden van het weegplateau naar buiten staken. Het weegplateau is in het kader van dit project ontwikkeld en bestaat uit een star frame. Het weegplateau is schematisch weergegeven in figuur 19. Op foto 6 in bijlage 2 is het plateau te zien, op de foto's 5 en 7 zijn de buiten de oven uitstekende uiteinden te zien, die via verstelbare plateau-standaards op de balansen drukken.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

Hiermee is voor verschillende produktgewichten een goede begininstelling op de balansen te realiseren. IJking van het weegplateau toonde een goede nauwkeurigheid aan van enkele grammen, zowel met als zonder ingeschakelde convectie.

De begin- en eindgewichten van de produkten zijn bepaald met een aparte elektronische balans.

De meetgegevens zijn door middel van een data-acquisitiesysteem opgeslagen in een computer voor verdere verwerking in grafieken en ten behoeve van berekeningen, zie foto 7 in bijlage 2.

2.6 Kwaliteitsbepaling van de produkten

Zoals reeds vermeld is de bruining per produkt constant gehouden gedurende de bakproeven onder verschillende bakcondities. De bruining is primair visueel bepaald en tevens voor iedere proef door IGMB gecontroleerd door middel van kleurmeting met een Dr. Lange LF90 kleurmeter.

Bij de kwaliteitsbepaling van de gebakken broden en de ontbijtkoek zijn de volgende parameters bepaald:

- het volume,
- het specifieke volume (volume per kg eindprodukt).

Voor de beoordeling van de biscuits zijn de volgende bepalingen verricht:

- de dikte (gemiddelde per biscuit uit de hoogte van een stapel van 5 biscuits),
- de gemiddelde diameter.

3 Resultaten en discussie

3.1 Biscuit

3.1.1 Temperatuurverloop tijdens het bakken

De figuren 3,4 en 5 geven het temperatuurverloop weer van de biscuit op diverse plaatsen (rand, kern, onderzijde en bovenzijde), van de ovenluchttemperatuur en van de onderzijde van de bakplaat. Er is enige onnauwkeurigheid in de beginpunten van de curves, doordat de eerste scan meestal niet exact samenvalt met het moment waarop de biscuit in de oven geplaatst wordt. De temperaturen zijn dan op het moment van de eerste scan al iets opgelopen.

In figuur 3 zijn twee proeven zonder convectie met hoog respectievelijk laag dauwpunt gepresenteerd. De temperatuurinstelling van de kruin- en vloerelementen was 230/230 °C, de resulterende ovenluchttemperatuur ligt tussen 210 °C en 230 °C (tijdens de proef met een hoog dauwpunt enkele graden lager dan tijdens de proef met laag dauwpunt). De onderzijde van de biscuit wordt heter dan rand-, kern- en oppervlaktetemperatuur.

In figuur 4 zijn soortgelijke grafieken weergegeven van twee proeven met convectie eveneens met hoog respectievelijk laag dauwpunt. De ingestelde temperaturen van kruin- en vloerelementen waren 180/180 °C, de ovenluchttemperatuur ligt op vrijwel 180 °C. De biscuit-eindtemperaturen verschillen nauwelijks voor de proef met hoog of met laag dauwpunt. Bij alle curves van de figuren 3 en 4 is te zien dat de verschillende biscuittemperaturen bij 100 °C gedurende een korte tijd vrijwel aan elkaar gelijk worden. Dit punt ligt op een baktijd tussen 1.5 en 2 minuten.

De verschillen tussen de proeven met en zonder convectie zijn het beste te zien indien de temperatuurcurves in één grafiek zijn weergegeven, zie figuur 5. Figuur 5A geeft de curves weer van de figuren 3 en 4, figuur 5B geeft soortgelijke curves voor nog een meetserie met dezelfde vier ovencondities (de ovenluchttemperatuur is hierin niet weergegeven). Opvallend is bij beide meetseries, dat de onderzijde van de bakplaat tijdens de proeven zonder convectie beduidend hoger in temperatuur is dan tijdens de proeven met convectie. Dit heeft tevens een hogere temperatuur van de onderzijde van de biscuits tot gevolg. Tabel 1 geeft de eindtemperaturen weer van het produktoppervlak, de kern en de onderzijde van de bakplaat. De bakplaat-eindtemperatuur is gemiddeld 30 °C hoger tijdens de proeven zonder convectie dan tijdens de proeven met convectie. De kerneindtemperatuur ligt (op één uitzondering na) bij de proeven zonder convectie gemiddeld 16 °C hoger dan bij de proeven met convectie. De oppervlakte-eindtemperatuur tenslotte ligt gemiddeld 12 °C hoger zonder dan met convectie. Na het punt van 100 °C is de gemiddelde biscuittemperatuur tijdens de proeven zonder convectie dus iets hoger dan tijdens de proeven met convectie. Dit zou een effect kunnen hebben op het inbakverlies en de verdampingssnelheid, zie § 3.1.2.

Uit de grafieken en tabel 1 kan geconcludeerd worden, dat de proeven redelijk goed reproduceerbaar zijn.

Figuur 6 presenteert de ovenwandtemperaturen en de ovendeurtemperatuur voor een proef met convectie (6A) en een proef zonder convectie (6B). Tijdens de proeven met convectie zijn de drie wandtemperaturen aan elkaar gelijk, de ovendeurtemperatuur ligt circa 10 °C lager. Tijdens de proeven zonder convectie ligt de temperatuur van de linkerwand (dat is de fermiculietwand met diverse doorvoeren) iets lager dan de temperaturen van de achter- en rechterwand. De ovendeurtemperatuur ligt nog iets lager en is circa 20 °C lager dan de achterwandtemperatuur. Voor de warmteoverdrachtsberekeningen is gebruik gemaakt van een oppervlakte-gewogen gemiddelde wandtemperatuur, bepaald uit de vier gemeten deur- respectievelijk wandtemperaturen.

De figuren 7 en 8 geven de temperaturen weer van de kruin- en vloerelementen tijdens proeven met de vier gekozen ovencondities. Figuur 7 betreft proeven met convectie, met respectievelijk laag dauwpunt (7A) en hoog dauwpunt (7B). De temperatuur van een element dat inschakelt, kan 20 tot 30 °C hoger liggen dan de temperatuur van de elementen, die niet bijstaan. Afhankelijk van het schakelgedrag tijdens de proef, kan de gemiddelde stralingstemperatuur van kruin of vloer hierdoor gemakkelijk 10 tot 20 °C variëren. Bij het bakken van de biscuits is dit effect groter dan bij brood en ontbijtkoek door de relatief korte baktijd van 6 minuten (ten opzichte van 30 respectievelijk 45 min.). Te zien is dat in het geval van figuur 7A de kruintemperatuur hoger geweest is, terwijl in geval van figuur 7B juist de vloertemperatuur hoger geweest is.

Figuur 8 betreft soortgelijke figuren voor proeven zonder convectie, met laag (8A) en hoog dauwpunt (8B). De temperaturen van de elementen van de 2/3-secties liggen tussen 220 en 240 °C (ingestelde temperatuur was 230 °C), de temperaturen van de 1/3-sectie liggen echter veel hoger. Kennelijk hebben deze bijgestaan tijdens deze proeven. De temperatuur loopt daarbij op tot 280 °C. De gemiddelde stralingstemperaturen van kruin en vloer liggen dus hoger dan de voor beide ingestelde waarde van 230 °C en variëren per proef, zie ook tabel 1. Dit verklaart voor een deel de spreiding in de berekeningsresultaten van de warmtestromen.

3.1.2 Inbakverlies en verdampingssnelheid

Tabel 2 geeft de gemeten inbakverliezen weer in grammen per 20 biscuits. Het inbakverlies bij de proeven zonder convectie blijkt gemiddeld 5% hoger te liggen dan bij de proeven met convectie. Er is geen verschil tussen de proeven met hoog of laag dauwpunt. In § 3.1.1 bleek reeds, dat de gemiddelde biscuitemperatuur na het 100 °C-punt zonder convectie iets hoger ligt dan met convectie, waardoor de inwendige weerstand voor vochttransport lager ligt. De hogere luchtsnelheid tijdens de proeven met convectie weegt hier kennelijk niet tegenop. In andere woorden, het verschil in uitwendige weerstand voor het vochttransport door de grenslaag tussen de proeven met en zonder convectie blijkt minder bepalend te zijn dan het verschil in inwendige weerstand. Dit is theoretisch te verwachten [2].

Hierbij dient echter aangetekend te worden, dat het convectie-effect door het verticaal van onderen aanstromen van een gesloten horizontale plaat bovenop deze plaat niet zo groot zal zijn.

Indien een gelijke convectiestroom horizontaal door de bakruimte aangebracht zou worden, mag verwacht worden, dat zowel in- als uitwendige weerstand anders komen te liggen.

Figuur 9 geeft het gewicht als functie van de baktijd (9A) uitgaande van het be-
gingewicht en in 9B de verdampingssnelheid in gram per minuut als functie van
de baktijd voor het totale aantal biscuits dat per proef gebakken werd, te weten 20
stuks. Uitgezet zijn een proef met en één zonder convectie, beide bij laag dauw-
punt. De gewichts-curves lopen vrijwel parallel. De verdampingssnelheid neemt
in beide gevallen snel toe na 1 tot 1.5 minuut baktijd (het 100 °C punt werd im-
mers na 1.5 tot 2 minuten bereikt), bereikt een maximum van 7 gram per minuut
(omgerekend per biscuit is dit 5.8 mg/s) en neemt daarna weer af. De globale
vorm van de curves is in overeenstemming met eerder door IGMB gevonden cur-
ves voor biscuits [2]. Het maximum wordt bij de proef met convectie eerder be-
reikt dan bij de proef zonder convectie. Omdat het aantal datapunten (scans) bij
deze proeven gering is resulteren kleine onregelmatigheden in de gewichtsafna-
mecurve in nogal hoekige verdampingssnelheidscurves. Opvallend is echter, dat
zowel de hoogte van het maximum en het begin- en eindpunt van de curves gelijk
zijn. Gemiddeld ligt de verdampingssnelheid met convectie iets lager dan zonder
convectie. Nadere beschouwing van de verdampingssnelheidscurves van de ove-
rige proeven valt buiten het bestek van dit project.

3.1.3 Resultaten warmteoverdrachtsberekeningen

De warmteoverdracht door straling en convectie naar de biscuits is be-
rekend op basis van de gemeten produkt- en oventemperaturen. Met behulp van
de theorie voor vrije- respectievelijk gedwongen convectie zijn warmteover-
drachtscoëfficiënten voor de convectieve overdracht bepaald. Tevens zijn de ge-
meten emissiecoëfficiënten en benaderde zichthoeken toegepast voor het
berekenen van de stralingsoverdracht. De gasstraling en -absorptie door de oven-
lucht, waarin zich immers waterdamp en iets CO₂ bevindt dat in het infrarode ge-
bied enkele absorptiebanden heeft, zijn verwaarloosd. In bijlage 3 wordt de
toegepaste berekeningsmethode toegelicht.

De resultaten van de warmteoverdrachtsberekeningen zijn weergegeven in tabel
1. Hieruit blijkt in de eerste plaats, dat de uit de hoeveelheid straling en convectie
berekende totale opgenomen warmte tussen 0% en 40% hoger uitvalt dan de uit
de opwarming en het inbakverlies berekende opgenomen warmte. Voor de proe-
ven met convectie is de afwijking maximaal 20% en bestaat er voor de proeven
met hoog dauwpunt een goede overeenstemming. Voor de proeven zonder con-
vectie bedraagt de afwijking 25% tot 40% ten opzichte van de uit het inbakverlies
en de opwarming berekende waarde.

De grootste onnauwkeurigheid moet verwacht worden in de berekende warmte-
stromen door gedwongen convectie, op grond van de gekozen relaties (zie B3.1).
De stralingsoverdracht zal iets overschat zijn. Hoewel geen hoge nauwkeurigheid
aan de berekeningsresultaten kan worden toegekend, worden wel indicaties ge-
geven van het effect van de ovencondities op de warmteoverdracht.

Tijdens de proeven zonder convectie overheerst het stralingsaandeel in de totale warmte-overdracht (gemiddeld 78%) en in de overdracht naar de koektop (gemiddeld 74%). Er is weinig verschil in het stralingsaandeel naar de koektop tussen de proeven met hoog en laag dauwpunt. Het aandeel warmte dat via de bakplaat wordt overgedragen bedraagt gemiddeld 29% van de totale opgenomen warmte. Bij de proeven met convectie is eveneens weinig verschil in de aandelen straling en convectie opgetreden tussen de proeven met hoog en laag dauwpunt. Het convectieaandeel op de totale overdracht (gemiddeld 55%) overheerst net het stralingsaandeel, en voor de warmteoverdracht naar de koektop geldt dit eveneens (gemiddeld 56% convectie). Het aandeel warmte via de bakplaat neemt ten opzichte van de proeven zonder convectie af (gemiddeld 23%). Dit is gezien de beschouwing in 3.1.1 betreffende het temperatuurverloop van de onderzijde van bakplaat en produkt te verwachten.

Geconcludeerd kan worden, dat biscuits van overeenkomstige kwaliteit gebakken kunnen worden onder zeer uiteenlopende ovencondities. De biscuits hebben overeenkomende kleur, en een binnen 5% gelijk inbakverlies. Ook wat betreft de grootte en dikte zijn geen opvallende verschillen geconstateerd. De ovencondities liepen hierbij fors uiteen: het vochtgehalte in de bakruimte varieerde tussen gemiddelde dauwpunten van 19°C en 88 °C; de luchttemperatuur varieerde van 180 °C met convectie (1.3 m/s) tot gemiddeld 225 °C zonder convectie. Het type warmteoverdracht lijkt nauwelijks van invloed te zijn op de grote lijnen van de produktkwaliteit. De totale overgedragen hoeveelheid warmte is bepalend.

3.2 Ontbijtkoek

3.2.1 Temperatuurverloop tijdens het bakken

Bij ontbijtkoek zijn naast de oppervlaktetemperatuur en de temperaturen van kern, onderzijde van het produkt en onderzijde van de bak, tevens enkele temperaturen gemeten in de koek op verschillende afstanden van de onderzijde. Dit is gedaan door middel van thermokoppels, die gemonteerd waren op het uiteinde van enkele stokjes van verschillende lengte. Deze waren gepositioneerd op vaste afstanden van de onderzijde van de bak. Figuur 10 geeft de hiermee gemeten temperaturen weer, voor een proef met convectie en laag dauwpunt (10A) en een proef zonder convectie en laag dauwpunt (10 B). Omdat de thermokoppels op grotere afstand van de bodem pas door het rijzen van de koek in het deeg komen te zitten, stijgt de temperatuur ervan eerst. Gedurende het bakken komen ze succesievelijk in het deeg en gaan dan de deegtemperatuur aannemen. Bij een baktijd rond 30 minuten wordt de 100 °C bereikt. Bij enkele proeven heeft het koppel op 5 cm boven de bodem een temperatuur, die ligt tussen de kerntempertuur en de oppervlaktetemperatuur. Uit de momenten waarop de diverse koppels in het deeg geraken is de hoogte van de koek als functie van de baktijd bepaald. Deze hoogte is vervolgens gebruikt bij de berekening van de overgedragen warmtestromen door straling en convectie, zie bijlage 3.2 en § 3.2.3.

In figuur 10B is te zien, dat de oppervlaktetemperatuur minder snel oploopt dan in figuur 10A (met convectie). De over de baktijd gemiddelde oppervlaktetemperaturen zijn zonder convectie lager dan met convectie; zie tabel 3

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

In figuur 11 zijn voor de vier gekozen ovencondities de temperaturen van het produktoppervlak, de kern, de onderzijde van de koek en de onderzijde van de bak weergegeven. Tevens is de ovenluchttemperatuur hierin weergegeven. Deze verschilt weinig voor de proeven met en zonder convectie. De kerneindtemperatuur was bij alle proeven 105 à 106 °C. De oppervlakte-eindtemperatuur varieerde tussen 153 °C zonder convectie met hoog dauwpunt en 165 °C met convectie en laag dauwpunt. Uit tabel 3 is te zien, dat de oppervlakte-eindtemperaturen van alle proeven tussen deze uiterste waarden liggen. Ook de spreiding in de temperaturen aan de onderzijde is niet erg groot.

Uit tabel 3 en de temperatuurcurves kan geconcludeerd worden dat de proeven redelijk goed reproduceerbaar waren.

3.2.2 Inbakverlies en verdampingssnelheid

In de figuren 12 en 13 zijn het gewicht en de verdampingssnelheid weergegeven als functie van de baktijd. In figuur 12 betreft dit een proef met convectie met laag dauwpunt en in figuur 13 een proef zonder convectie eveneens met laag dauwpunt. De vorm van de curves is soortgelijk. Door oneffenheden in de gewichtsafnamecurves vertoont de verdampingssnelheidscurve (massaverlies per tijdseenheid) nogal wat pieken. Afvlakking van de curves zou echter curves opleveren, die voor beide gevallen niet veel verschillen. Het eindniveau ligt in beide gevallen rond de 8 gr/min. Nadat er aanvankelijk even een snel gewichtsverlies optreedt zakt de verdampingssnelheid en stijgt dan geleidelijk naar het eindniveau. Rond de 30 minuten baktijd (waarbij de gehele koek 100 °C bereikt heeft) ligt een licht buigpunt in de gewichtsafname curves, waarna de verdampingssnelheid ineens toeneemt.

Tabel 4 geeft het inbakverlies weer bij de diverse ovencondities. Zowel met als zonder convectie ligt het inbakverlies bij laag dauwpunt hoger dan bij hoog dauwpunt. Aangezien de ovenatmosfeer bij de optredende ovenluchttemperaturen zowel bij hoog als bij laag dauwpunt zéér onverzadigd is (dat wil zeggen dat de lucht bij die temperaturen veel méér waterdamp kan bevatten) kan het verschil in inbakverlies niet aan het verschil in ondervonden weerstand bij het afstaan van vocht aan de ovenlucht toegeschreven worden. Veeleer moet het lagere inbakverlies bij de proeven met hoog dauwpunt gezocht worden in het feit dat aan het begin van deze proeven kortstondig condensatie van waterdamp op het koekoppervlak plaatsvindt. Hierdoor treedt in de eerste minuten van het bakken niet de vochtverdamping op, die bij de proeven met laag dauwpunt wel optreedt. Uit de figuren 12B en 13B is af te leiden, dat de verdampingssnelheid in deze minuten in de orde grootte ligt van 6 tot 9 gr/min. Een verschil van 25 tot 70 gram in het inbakverlies kan derhalve in 4 tot 8 minuten ontstaan. De oppervlaktetemperatuur bereikt na 3 à 4 minuten 100 °C.

Het inbakverlies blijkt verder met convectie hoger te liggen dan zonder convectie. Dit wordt verklaard door de lagere gemiddelde oppervlaktetemperatuur tijdens de proeven zonder convectie, zie tabel 3. Hierdoor is er een lagere drijvende kracht voor massatransport in de koek.

3.2.3 Resultaten warmteoverdrachtsberekeningen

De berekeningsmethode is beschreven in bijlage B3.2. Tabel 3 geeft een overzicht van de berekeningsresultaten.

De uit de stralingsoverdracht en convectieve overdracht berekende totale opgenomen warmte ligt tussen 0% en 50% hoger, dan de uit het inbakverlies en de opwarming berekende opgenomen warmte. Voor de nauwkeurigheid van de berekeningsresultaten geldt hetzelfde als bij biscuit reeds is vermeld, zie § 3.1.3 en B3.4.

De verschillen in aandelen straling en convectie tussen de proeven met hoog en laag dauwpunt zijn zeer klein. De proeven zonder en met convectie geven een verschuiving te zien in de aandelen straling en convectie van gemiddeld 82% straling en 18% convectie zonder convectie naar gemiddeld 40% straling en 60% convectie met convectie.

Het aandeel warmte opgenomen via de bak bedraagt zonder convectie gemiddeld 52% en met convectie gemiddeld 42% op de totale opgenomen warmte berekend uit de stralings- en convectie-overdracht. Dit kan evenals bij biscuit verklaard worden uit de hoge vloerelementtemperaturen gedurende de proeven zonder convectie, hetgeen resulteert in een hoge stralingsoverdracht naar de bak.

Geconcludeerd kan worden, dat in kleur overeenkomende (gare) ontbijtkoek gebakken kan worden bij condities met of zonder convectie, met hoog of laag dauwpunt en oventemperaturen tussen 175 °C en 195 °C. Het inbakverlies liep hierbij maximaal uiteen van 3.8% tot 6.1% van het begingewicht van de koek (3.72 kg), voornamelijk tengevolge van condensatie van waterdamp op de koek bij de proeven met hoog dauwpunt. De aandelen straling en convectie liepen uiteen van overwegend straling (82%) tot overwegend convectie (60%).

3.2.4 Overige kwaliteitskenmerken

De hoogte van de ontbijtkoek is bepaald aan linker en rechter zijde, zie tabel 3. De grootste hoogte trad op bij de proeven zonder convectie, zonder stoom. Ook het soortelijk volume (volume per gewichtseenheid) was het hoogst bij de proeven zonder convectie, zonder stoom, zie tabel 3. De verschillen in de specifieke volumina bij de verschillende ovencondities bedragen echter maximaal 10%.

3.3 Brood

3.3.1 Temperatuurverloop tijdens het bakken

In figuur 14A zijn enkele temperaturen weergegeven voor een proef met convectie met laag dauwpunt. De kerneindtemperatuur was bij alle proeven 97 ° à 99 °C. De ovenluchttemperatuur lag tussen 200 en 220 °C. In figuur 14B is te zien dat dit bij de proeven zonder convectie eveneens het geval was, ondanks een veel hogere instelling van de elementtemperaturen, namelijk zonder convectie op 225/260 °C en met convectie op 210/230 °C. De variatie in het vochtgehalte van de bakruimte was bij brood niet zo groot, omdat bij alle proeven aan het begin van de bakproef is gestoomd.

De eindtemperaturen van het broodoppervlak varieerden tussen 175 °C en 188 °C, zie tabel 5. De eindtemperaturen met convectie lagen niet systematisch hoger of lager dan zonder convectie. De eindtemperaturen van de onderzijde van het bakblik lagen met convectie gemiddeld 14 hoger dan zonder convectie, zie tabel 5.

3.3.2 Inbakverlies en verdampingssnelheid

Tabel 6 geeft het inbakverlies weer van de verrichtte bakproeven met een deeggewicht van gemiddeld 908 gram. Geconcludeerd kan worden, dat het inbakverlies met convectie circa 20% hoger ligt dan zonder convectie, ongeacht het vochtgehalte van de bakruimte. Een verklaring hiervoor zou kunnen liggen in de hogere temperaturen van de onderzijde van het produkt. Wellicht kan nog een verschil ontstaan zijn doordat het condensaatlaagje op het produktoppervlak met convectie eerder weer afgevoerd is dan zonder convectie. Of dit echter de grootte van het verschil zou kunnen verklaren is twijfelachtig. Overigens betekent het verschil van 20% in het inbakverlies met en zonder convectie, uitgedrukt in percentages inbakverlies ten opzichte van deeggewicht, een verschil tussen 14% met en 11% zonder convectie.

De figuren 15 en 16 geven het gewicht en de verdampingssnelheid als functie van de baktijd voor een proef met en een proef zonder convectie. Opnieuw komen de curves opmerkelijk met elkaar overeen. De verdampingssnelheid loopt op tot een maximum van circa 13 gr/min met convectie en circa 11 gr/min zonder convectie. Daarna loopt de verdampingssnelheid geleidelijk terug. Met convectie wordt het maximum eerder bereikt dan zonder convectie.

3.3.3 Resultaten warmteoverdrachtsberekeningen

De berekeningsmethode is weergegeven in bijlage B3.3. Tabel 5 geeft de resultaten. De totale overgedragen warmte berekend uit de stralings- en convectie overdracht blijkt bij gedwongen convectie 10 tot 25% lager te liggen dan de uit de opwarming en het gemeten inbakverlies berekende totale opgenomen warmte. Het stralingsaandeel op de totale overgedragen warmte was gemiddeld 34% en het convectieaandeel 66%. Via het bakblik werd gemiddeld 28% overgedragen. Helaas kunnen geen vergelijkingen gemaakt worden met waarden bij proeven zonder convectie.

Opgemerkt wordt dat hoewel 12 bakproeven zijn bemeten, slechts bij enkele proeven alle meetdata die nodig zijn voor de berekening van de warmteoverdracht door straling en convectie correct waren. Met name enkele elementtemperaturen en de temperatuur van het bakblik bleken bij veel proeven foutieve waarden aan te geven. Hierdoor konden de warmteoverdrachtsberekeningen slechts voor drie proeven worden uitgevoerd.

3.3.4 Broodvolume

In figuur 17 zijn de gemeten broodvolumina uitgezet als functie van de ovencondities. De volumina verschillen niet significant bij de verschillende typen warmteoverdracht en vochtgehalte van de bakruimte.

3.4 Enkele overwegingen

Hoewel dit niet als feitelijkheid uit de berekeningsresultaten van de warmteoverdracht is te concluderen, gezien de matige nauwkeurigheid ervan, lijkt het uitgangspunt om per produkt met constante kleur te bakken te hebben geleid tot het creëren van ovencondities waarbij de totale overgedragen warmte min of meer constant is gebleven. De resulterende produkten waren van goede kwaliteit (gaar, goed volume en goede vorm, goede kleur en acceptabel inbakverlies). Op het inbakverlies bij brood na waren er geen kwaliteitsverschillen te relateren aan het type warmteoverdracht en afgezien van het optreden van condensatie op het produktoppervlak was ook het vochtgehalte van de ovenatmosfeer niet van invloed.

Deze overweging leidt tot de volgende nader te verifiëren hypothesen:

- Voor de grote lijnen van de kwaliteit, dat wil zeggen goede gaarheid, kleur, volume en vorm, en acceptabel inbakverlies, is de totale overgedragen warmte bepalend, ongeacht het type warmteoverdracht en het vochtgehalte van de ovenatmosfeer, mits een zeker minimum aandeel straling aanwezig is.
- Beheersing van de totale overgedragen warmte leidt tot beheersing van het inbakverlies.

Hierbij kan de volgende toelichting gegeven worden:

Het gestelde in hypothese a) wordt bevestigd door de resultaten van de Vries en Rask (1990) [5] ^{*)}. Zij varieerden bij het bakken van brood de convectie op drie niveaus, bij drie baktemperaturen. Hiermee werden de aandelen straling en convectie gevarieerd. In figuur 18A is de door hen gemeten korstkleur (helderheid) uitgezet tegen de verhouding convectie en straling. Het blijkt dat die verhouding nauwelijks van invloed is, wel het temperatuurniveau in de oven. In figuur 18B is de korstkleur uitgezet tegen de oppervlaktetemperatuur. Hier blijkt een duidelijk verband te bestaan namelijk bij hogere oppervlaktetemperatuur is de helderheid lager (ofwel de kleur donkerder). Gecombineerd zou hieruit af te leiden zijn, dat niet het type warmteoverdracht, maar de totale overgedragen warmte bepalend is voor de kleur.

Bij alle proeven van de Vries en Rask en gedurende het onderhavige onderzoek was er een zeker aandeel straling in de totale warmteoverdracht. In de wetenschap, dat bij het stomen van brood [6] geen kleuring optreedt, rijst de veronderstelling dat een zeker minimum aan stralingsoverdracht noodzakelijk is voor het verkrijgen van een goed produkt. Dus: de totale warmteoverdracht is bepalend, maar binnen zekere grenzen.

Wat betreft hypothese b) zij opgemerkt dat deze niet verstaan moet worden, als zou het inbakverlies altijd uitsluitend door de totale overgedragen warmte bepaald worden. Wel dat de totale overgedragen warmte de belangrijkste factor lijkt te zijn. Vast lijkt te staan dat het al of niet optreden van condensatie op het produktoppervlak aan het begin van de bakproef van invloed is op het inbakverlies (enkele procenten ten opzichte van het deeggewicht bij ontbijtkoek en brood), hetzij doordat hierdoor de totale overgedragen warmte wordt beïnvloedt, hetzij doordat de 'eigen verdamping' wordt uitgesteld.

Impliciet stelt deze hypothese tevens, dat de bepalende weerstand voor het massatransport binnen het produkt ligt en niet buiten het oppervlak.

Dit alles overwegende rijst de vraag of het ontwikkelen van regeling van aandelen straling en convectie tijdens het bakken met het oog op produktkwaliteitsbeheersing wel zinvol geacht moet worden. Bovenstaande leidt eerder tot de noodzaak om te komen tot sturing van de totale overgedragen warmte voor het bereiken van een in hoofdlijnen goed produkt. Gedacht kan worden aan het (zo nodig) ontwikkelen van een 'fijnregeling' die een produktafhankelijke nuancering van de kwaliteit bewerkstelligt (bijvoorbeeld de verhouding onder- en bovenwarmte bij brood).

De sturing van de totale overgedragen warmte kan in theorie op vele manieren uitgevoerd worden. Hierbij zou een minimum energieverbruik centraal moeten staan. Snelle en goed regelbare technieken als diëlectrische verhitting vinden hierin wellicht een plaats.

^{*)} Met dank aan P.J.T. Bussmann voor de analyse.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

Voor de meetgrootte waarop de sturing gebaseerd wordt kunnen eveneens verschillende keuzen gemaakt worden. Gedacht kan worden aan het (gemiddelde) vochtgehalte in het produkt tijdens het bakken door middel van de tevens binnen het oventechnologieproject in ontwikkeling zijnde sensor.

Ten aanzien van de modulaire proefoven leidt bovenstaande beschouwing niet tot ingrijpende koerswijzigingen: de hypothesen dienen allereerst geverifieerd te worden en dit vereist het kunnen variëren van aandelen straling en convectorie in grotere extremen dan tot nu toe gedaan is. Dit zou gecombineerd dienen te worden met meting van de totale overgedragen warmte. Voor platte produkten als ontbijtkoek kan gedacht worden aan de methode die door Sluimer en Krist (1985) is toegepast met behulp van warmtestroommeters [7].

Wat betreft modelonderzoek met behulp van computermodellen als toegepast door de TPD (1990) dient een groter accent gelegd te worden op de processen binnen het produkt (inclusief korst). Gezien het gestelde dat het type warmteoverdracht er binnen zekere grenzen niet toe doet, lijkt zeer gedetailleerde modellering van de straling en convectorie in de bakruimte minder van belang dan aanvankelijk gedacht werd. Tevens lijkt het in dit verband van minder belang de preciese snelheidsvelden rondom de diverse produkten in kaart te brengen.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

4.1.1 Algemene conclusies

1. Er is een weegplateau gerealiseerd in de bakruimte van de oven, waarmee gedurende het bakken het produktgewicht continu gemeten kan worden. Hiervan is tevens voor een ander deelproject in het oventechnologieproject 1990 gebruik gemaakt.
2. Onvoldoende inzicht is verkregen in het stromingspatroon in de oven tijdens het bakken van de verschillende produkten. Hierdoor bestaan er vrij grote onzekerheden in de verkregen berekeningsresultaten voor met name de warmteoverdracht door gedwongen convectorie.
3. De uit de stralingsoverdracht en convectorie warmteoverdracht berekende totale overgedragen warmte week tussen 0% en 50% af van de uit de opwarming van het produkt en het gemeten inbakverlies berekende overgedragen warmte.
4. Gebleken is, dat produkten van goede kwaliteit (gaar, voldoende volume en goede vorm, acceptabel inbakverlies) met overeenkomende kleur gebakken kunnen worden onder uiteenlopende ovencondities. Hierbij liepen de aandelen straling en convectorie uiteen van overwegend straling (tot 82%) tot overwegend convectorie (tot 60%). Het type warmteoverdracht bleek nauwelijks van invloed op de grote lijnen van de produktkwaliteit.
5. Het vochtgehalte van de ovenatmosfeer is verwerkt in de warmteoverdrachtsberekeningen bij de bepaling van de stoffeigenschappen waarbij de Re- en Nuggtallen worden berekend. Dit leidt nauwelijks tot verschillen in de berekende warmteoverdrachtscoëfficiënten. Opgemerkt wordt, dat stralingsabsorptie door de waterdamp en CO₂ in de ovenatmosfeer en de gasstraling verwaarloosd zijn, omdat verwacht mag worden dat deze elkaar voor het grootste deel nivelleren.
6. Het belangrijkste effect van het verschil in vochtgehalte van de ovenatmosfeer lijkt te zijn het al of niet optreden van condensatie op het produktoppervlak aan het begin van de bakproef.

4.1.2 Specifieke conclusies

1. Het blijkt mogelijk om biscuits van overeenkomstige kwaliteit te bakken onder uiteenlopende ovencondities. De biscuits hebben overeenkomende kleur, goede vorm en een binnen 5% gelijk inbakverlies. Ook wat betreft de grootte en dikte zijn geen opvallende verschillen geconstateerd. De ovencondities liepen hierbij fors uiteen: het vochtgehalte in de bakruimte varieerde tussen gemiddelde dauwpunten van 19°C en circa 80 °C; de luchttemperatuur varieerde van 180 °C met convectorie (1.3 m/s) tot gemiddeld 225 °C zonder convectorie.
2. Bij biscuit blijkt het type warmteoverdracht nauwelijks van invloed te zijn op de grote lijnen van de produktkwaliteit. Ook het vochtgehalte in de bakruimte is niet van invloed.

3. Bij ontbijtkoek varieerde de ovenluchttemperatuur tussen 175 °C met convector en 195 °C zonder convector en het dauwpunt tussen circa 20 en 88 °C. Bij de proeven met hoog dauwpunt bleek het inbakverlies zowel met als zonder convector 10 tot 30% lager te liggen dan bij laag dauwpunt (2% verschil ten opzichte van het deeggewicht). Dit is hoogstwaarschijnlijk te wijten aan het optreden van condensatie op het produktoppervlak gedurende de proeven met hoog dauwpunt, waardoor de verdamping pas later op gang komt.
4. Bij ontbijtkoek blijkt het volume bij de proeven zonder convector, zonder stoom het hoogst te zijn, evenals het specifieke volume (maximaal 10% hoger). De verschillen in kwaliteit zijn niet groot en zijn niet te relateren aan het verschil in aandelen straling en convector.
5. Bij brood varieerde de ovenluchttemperatuur met en zonder convector weinig (tussen 200 en 220 °C) bij temperatuurinstellingen van de kruin- en vloerelementen van respectievelijk 210/230 °C met convector en 230/260 °C zonder convector. Het dauwpunt varieerde van 40 °C tot 90 °C, omdat er aan het begin van de proeven telkens kort gestoomd is. Het inbakverlies bleek met convector circa 20% hoger te liggen dan zonder convector (3% verschil ten opzichte van het deeggewicht).
6. Het broodvolume verschilt niet significant voor de verschillende ovencondities.

4.2 Aanbevelingen

1. Aanbevolen wordt de in § 3.4 geformuleerde hypothesen middels gericht experimenteel- en modelonderzoek voor verschillende typen produkten te verifiëren. Deze luiden:
 - a. voor de grote lijnen van de kwaliteit, dat wil zeggen goede gaarheid, kleur, volume en vorm, en acceptabel inbakverlies, is de totale overgedragen warmte bepalend, ongeacht het type warmteoverdracht en het vochtgehalte van de ovenatmosfeer, mits een zeker minimum aandeel straling aanwezig is,
 - b. beheersing van de totale overgedragen warmte leidt tot beheersing van het inbakverlies.
2. Ten aanzien van de te bouwen modulaire proefoven leidt 1) tot de volgende eisen:
 - a. straling en convector dienen zoveel mogelijk los van elkaar aangeboden te kunnen worden,
 - b. er dient naast een stralingsbron in de bakruimte (elementen) een aparte warmtebron te zijn voor het aanbieden van hete lucht zonder dat de elementen in de bakruimte aan hoeven te zijn,
 - c. convector dient zowel in horizontale als verticale richting aangeboden te kunnen worden, gezien de variatie in de te bakken produkten,
 - d. er dient op goed gecontroleerde wijze vocht in de bakruimte gebracht te kunnen worden, waarbij 'spetteren' of andere ongewenste condensatie voorkomen dient te worden en een goede homogeniteit over de bakruimte gewaarborgd is,
 - e. onder- en bovenwarmte zouden onafhankelijk van elkaar gevarieerd moeten kunnen worden,

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

- f. aandacht dient geschonken te worden aan de regeling(en) op de oven: de samenhang tussen het gemeten signaal en de te verwezenlijken ovenconditie dient eenduidig vast te liggen (directe sturing op elementtemperatuur en ovenluchttemperatuur).
- 3. Ten aanzien van de experimenten wordt aanbevolen dat:
 - a. de procescondities extremer gekozen worden bij variabele baktijd: gezocht dient te worden naar de uiterste condities, waarbij bij constant houden van de meeste kwaliteitskenmerken (het produkt moet in ieder geval gaar zijn) een zeker kwaliteitskenmerk nog net aanvaardbaar is (bijvoorbeeld inbakverlies constant houden door totale overgedragen warmtehoeveelheid constant te houden, zoeken naar minimale stralingsaandeel waarbij voldoende kleuring optreedt),
 - b. nagegaan wordt welk effect condensatie op het produktoppervlak aan het begin van de bakproef precies heeft onder andere op de totaal overgedragen warmte en op het inbakverlies,
 - c. zeker bij korte baktijden aandacht geschonken wordt aan het regelgedrag van de oven, om spreiding in de resultaten tengevolge van verschillen in de aan/uit tijden van de elementen per bakproef te minimaliseren. Dit geldt zeker bij de huidige Becker oven maar ook bij de modulaire proefoven dient dit aspect niet uit het oog verloren te worden,
 - d. gestreefd wordt naar directe meting van de totale overgedragen warmte, bijvoorbeeld door middel van warmtestroommeters,
 - e. nagegaan wordt in hoeverre het zinvol is grote inspanning te verrichten om de snelheidsvelden rondom de produkten te meten (zie § 3.4 voor de opbouw van dit argument),
 - f. bakproeven met biscuit met convectie zeker in de Becker oven verricht worden op een gaasmatrix.
- 4. Ten aanzien van modelonderzoek door middel van computermodellen wordt in overweging gegeven om:
 - a. de aandacht meer te richten op de processen binnen het produkt en in de korst daarvan,
 - b. gedetailleerde modelvorming van straling en convectie in de bakruimte te laten rusten totdat uitsluitsel verkregen is omtrent de genoemde hypothesen en de richting van de ontwikkeling van de gewenste sturing van het bakproces duidelijk is geworden.
- 5. Tenslotte wordt aanbevolen om de mogelijkheden te onderzoeken om te komen tot sturing tijdens het bakproces van de totale aan het produkt overgedragen warmte op basis van het (gemiddelde) vochtgehalte in het produkt (bepaalt de hoofdlijnen van de kwaliteit). Bij de uitvoering hiervan dient een minimum energieverbruik het uitgangspunt te zijn. Overwogen kan worden daarnaast een 'fijnregeling' te ontwikkelen voor optimalisatie van de per produkt belangrijkste geachte kwaliteitskenmerken (nuancering van de kwaliteit).

5 Literatuur

- [1] Verlaan, P. e.a.
Basisinformatie ten behoeve van een Meerjarenplan van activiteiten gericht op energiebesparing in de brood- en banketindustrie,
IGMB-rapport I 89-74 (1989).
- [2] Vries, U.A. de & Vliert, M. van de,
Drogen en kleuren van bakprodukten met een relatief laag eindvochtgehalte,
IGMB-rapport 90-48 (1990).
- [3] Chapman, A.J.
Heat transfer,
Collier Macmillan Int. Ed. (1974).
- [4] Kutateladze, S.S. e.a.
A concise Encyclopedia of Heat transfer,
Pergamon Press (1966).
- [5] Vries, U. de & Rask, C.
Heat and mass transfer during baking,
In: Processing and quality of foods, vol 1, Elsevier Applied Science, (1990), p1. 145-1.152.
- [6] Vries, U.A. de & Heddes, C.E.A.
Haalbaarheidsstudie naar het stomen en kleuren van brood in plaats van bakken,
IGMB-rapport nr I 87-709 (1987).
- [7] Krist, C.E. & Sluimer, P.
Heat transfer in ovens during the baking of bread,
In: Cereals in a European context, First European Conference on Food Science and Technology, Morton, I.D. ed.
Ellis Horwood Ltd. Chicester (1987), 344-354.
- [8] VDI-Wärmeatlas (1984),
Bladt Gf1.

6 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever
Instituut voor Voedingsmiddelen Technologie
afdeling IGMB
t.a.v. Dr. Ir. P. Verlaan
Postbus 15
6700 AA Wageningen

Namen en functies van de medewerkers
W.F. Sulilatu, onderzoeksmedewerker

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed
N.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad
oktober 1990 - maart 1991

Ondertekening



ir. C.E. Krist-Spit
onderzoekleider

Goedgekeurd door



ir. H.C. van Deventer
werkgroep leider

Tabel 1 Overzicht van de resultaten bij biscuit

		zonder convectie						met convectie			
Ingestelde condities											
T kruin/T vloer	°C	230/230	230/230	230/230	230/230	230/230	230/230	180/180	180/180	180/180	180/180
T dauwpunt	°C	15	15	15	15	90	90	15	15	90	90
proef datum		BISC21 7/1/91	BISC31 7/1/91	BISC71 10/1/91	B230001 25/2/91	BISC91 10/1/91	B23S01 25/2/91	BISC41 10/1/91	B18041 25/2/91	BISC51 10/1/91	B18S41 25/2/91
Gemeten condities											
ovenluchttemperatuur gemiddeld ¹⁾	°C	227	225	221	224	211	211	179	178	175	174
dauwpunttemperatuur gemiddeld	°C	20	19	38	20	78	73	20	19	88	74
kruintemperatuur gemiddeld	°C	240	240	227	238	227	240	186	191	176	181
vloertemperatuur gemiddeld	°C	245	244	232	242	226	244	188	183	188	186
Gemeten produktgegevens											
oppervlaktetemperatuur gemiddeld	°C	99	94	93	106	106	105	95	97	100	108
eindtemperatuur produktoppervlak	°C	145	136	136	132	136	128	127	127	116	124
eindtemperatuur kern	°C	132	132	132	126	132	132	116	116	116	131
eindtemperatuur onderzijde bakplaat	°C	200	200	188	200	198	202	174	169	169	166
begingewicht 20 biscuits	gr	-	-	174.8	175.8	175.4	172.5	169.4	173.4	174.7	177.2
inbakverlies	gr	-	-	31.1	31.7	31.7	31.9	30.4	30.2	29.9	30.0
Berekeningsresultaten											
opgenomen warmte uit inbakverlies en opwarming	kJ	100	100	100	100	100	100	94	94	93	93
opgenomen warmte uit straling en convectie	kJ	140	144	131	124	110	119	105	114	96	93
opgenomen warmte uit str/conv. per kg eindprodukt	kJ/kg	-	-	912	861	765	846	755	796	663	632
stralingswarmte koektop	kJ	71	72	64	67	60	69	36	40	30	32
stralingswarmte naar bakplaat	kJ	37	38	33	30	26	28	11	11	13	12
convectiewarmte koektop	kJ	26	26	26	23	20	20	48	50	41	39
convectiewarmte naar bakplaat	kJ	7	8	8	5	5	2	11	13	12	10
som str. en conv. warmte naar bakplaat	kJ	44	46	42	34	31	30	21	24	25	22
aandeel warmte bakplaat op totale opgenomen warmte	%	31	32	32	28	28	25	20	21	26	23
aandeel straling op totale opgenomen warmte	%	77	77	74	78	78	81	44	45	45	47
aandeel convectie op totale opgenomen warmte	%	23	23	26	22	22	19	56	55	55	53
aandeel straling op koektop	%	73	73	71	74	75	78	43	45	42	47
aandeel convectie op koektop	%	27	27	29	26	25	22	57	55	58	53
aandeel straling naar bakplaat	%	84	84	80	86	83	93	51	46	54	55
aandeel convectie naar bakplaat	%	16	16	20	14	17	7	49	54	46	45

¹⁾ gemiddeld over de baktijd van 6 minuten

*Bakregime metingen aan brood, biscuit en ontbijtkoek***Tabellen***Tabel 2 Inbakverlies bij **biscuit** bij de verschillende ovencondities*

		met convectie		zonder convectie	
T kruin/vloer	°C	180/180	180/180	230/230	230/230
T dauwpunt	°C	15	90	15	90
datum		inbakverlies (gr)		inbakverlies (gr)	
10/01/91		30.4	29.9	31.1	31.7
25/02/91		30.2	30.0	31.9	31.8
gemiddeld		30.3	30.0	31.5	31.8
theoretisch opgenomen warmte (kJ)		94	93	100	100

Tabel 3 Overzicht van de resultaten bij ontbijtkoek

		zonder convectie				met convectie			
Ingestelde condities									
T kruin/T vloer	°C	200/200	200/200	200/200	200/200	180/180	180/180	180/180	180/180
T dauwpunt	°C	15	15	90	90	15	15	90	90
proef datum		DKOEK 24/1/91	020001 28/2/91	CKOEK 24/1/91	020S01 28/2/91	AKOEK 24/1/91	018042 28/2/91	BKOEK 24/1/91	018S41 28/2/91
Gemeten condities									
ovenluchttemperatuur gemiddeld ¹⁾	°C	193	192	187	189	178	178	174	177
dauwpunttemperatuur gemiddeld	°C	39	32	86	87	21	19	87	88
kruitemperatuur gemiddeld	°C	208	206	207	208	188	188	181	181
vloertemperatuur gemiddeld	°C	208	204	198	211	189	189	188	190
Gemeten produktgegevens									
oppervlaktetemperatuur gemiddeld	°C	130	129	124	129	147	142	132	143
eindtemperatuur produktoppervlak	°C	165	163	153	156	165	159	160	160
eindtemperatuur kern	°C	106	105	105	105	106	106	105	105
eindtemperatuur onderzijde bak	°C	184	183	168	178	176	171	173	174
begingewicht koek	gr	3737	3708	3712	3718	3715	3720	3736	3725
inbakverlies	gr	171	180	144	154	228	221	143	170
hoogte koek links/rechts	mm	74/67	74/76	70/66	70/70	70/65	72/73	71.5/65	70/75
soortelijk volume eindprodukt	ml/gr	3.7	3.7	3.3	3.3	3.6	3.6	3.4	3.5
Berekeningsresultaten									
opgenomen warmte uit inbakverlies en opwarming	kJ	1016	1016	958	958	1118	1118	973	973
opgenomen warmte uit straling en convectie	kJ	1347	1448	1347	1509	1098	1409	1203	1317
opgenomen warmte uit str/conv. per kg 									

1) gemiddeld over de baktijd van 45 minuten

*Bakregime metingen aan brood, biscuit en ontbijtkoek**Tabel 4 Inbakverlies bij ontbijtkoek bij de verschillende ovencondities*

		met convection		zonder convection	
T kruin/vloer	°C	180/180	180/180	200/200	200/200
T dauwpunt	°C	15	90	15	90
datum		inbakverlies (gr)		inbakverlies (gr)	
24/01/91		228	143	171	144
28/02/91		221	170	180	154
gemiddeld		224.5	156.5	175.5	149
theoretisch opgenomen warmte (kJ)		1118	973	1016	958

Tabel 5 Overzicht van de resultaten bij brood

		zonder convectie						met convectie					
Ingestelde condities													
T kruin/T vloer	°C	230/260	225/260	230/260	230/260	225/260	230/260	230/210	230/210	230/210	230/210	230/210	230/210
T dauwpunt	°C	70	70	70	90	90	90	70	70	70	90	90	90
proef		BRD4C	BRD8C	BRD23001	BRD3C	BRD7C	BR23S01	BRD2C	BRD6C	BR2104	BRD1C	BRD5C	BR21S4
datum		17/1/91	18/1/91	1/3/91	17/1/91	18/1/91	1/3/91	17/1/91	18/1/91	1/3/91	17/1/91	18/1/91	1/3/91
Gemeten condities													
ovenluchttemperatuur gemiddeld ¹⁾	°C	214	200	221	214	-	216	209	206	207	205	206	207
dauwpunttemperatuur gemiddeld	°C	-	74	55	86	87	91	57	67	40	87	84	90
kruintemperatuur gemiddeld	°C	229	233	231	219	234	238	206	226	224	207	228	232
vloertemperatuur gemiddeld	°C	-	256	254	-	254	254	-	216	217	207	218	253
Gemeten produktgegevens													
oppervlaktetemperatuur gemiddeld	°C	155	156	-	153	157	-	144	-	151	-	157	-
eindtemperatuur produktoppervlak	°C	185	184	-	187	188	-	175	-	184	-	184	178
eindtemperatuur kern	°C	98	99	98	97	99	99	97	99	98	98	99	99
eindtemperatuur onderzijde bakblik	°C	180	-	194	183	179	187	201	-	203	185	200	202
begingewicht per brood	gr	903	916	757 ²⁾	905	912	760 ²⁾	904	911	767 ²⁾	905	907	758 ²⁾
inbakverlies per brood	gr	107	99	92	101	105	96	129	127	114	126	122	114
volume linkerbroden gemiddeld	ml	4650	4350	4300	4275	4350	4350	4350	4400	4450	4250	4250	4225
volume rechterbroden gemiddeld	ml	4800	4650	4300	4450	4600	4400	4450	4450	4650	4450	4250	4350
Berekeningsresultaten													
opgenomen warmte uit inbakverlies en opwarming	kJ	409	394	348	396	406	357	457	454	398	451	443	396
opgenomen warmte uit straling en convectie	kJ	-	-	-	-	-	-	-	-	361	-	343	360
opgenomen warmte uit str/conv. per kg eindprodukt	kJ/kg	-	-	-	-	-	-	-	-	553	-	437	559
stralingswarmte broodtop	kJ	-	-	-	-	-	-	-	-	91	-	91	94
stralingswarmte brood in blik	kJ	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	35	25
convectiewarmte broodtop	kJ	-	-	-	-	-	-	-	-	167	-	130	179
convectiewarmte brood in blik	kJ	-	-	-	-	-	-	-	-	78	-	87	63
som str. en conv. warmte naar bakblik	kJ	-	-	-	-	-	-	-	-	103	-	122	88
aandeel warmte via blik op totale opgenomen warmte	%	-	-	-	-	-	-	-	-	29	-	36	24
aandeel straling op totale opgenomen warmte	%	-	-	-	-	-	-	-	-	32	-	37	33
aandeel convectie op totale opgenomen warmte	%	-	-	-	-	-	-	-	-	68	-	63	67
aandeel straling op broodtop	%	-	-	-	-	-	-	-	-	35	-	41	34
aandeel convectie op broodtop	%	-	-	-	-	-	-	-	-	65	-	59	66
aandeel straling naar brood in blik	%	-	-	-	-	-	-	-	-	24	-	29	28
aandeel convectie naar brood in blik	%	-	-	-	-	-	-	-	-	76	-	71	72

1) gemiddeld over de baktijd van 30 minuten

2) minder deeg genomen om vastlopen tegen de stoompijp te voorkomen

Bakregime metingen aan brood, biscuit en ontbijtkoek
*Tabel 6 Inbakverlies bij **brood** bij de verschillende ovencondities*

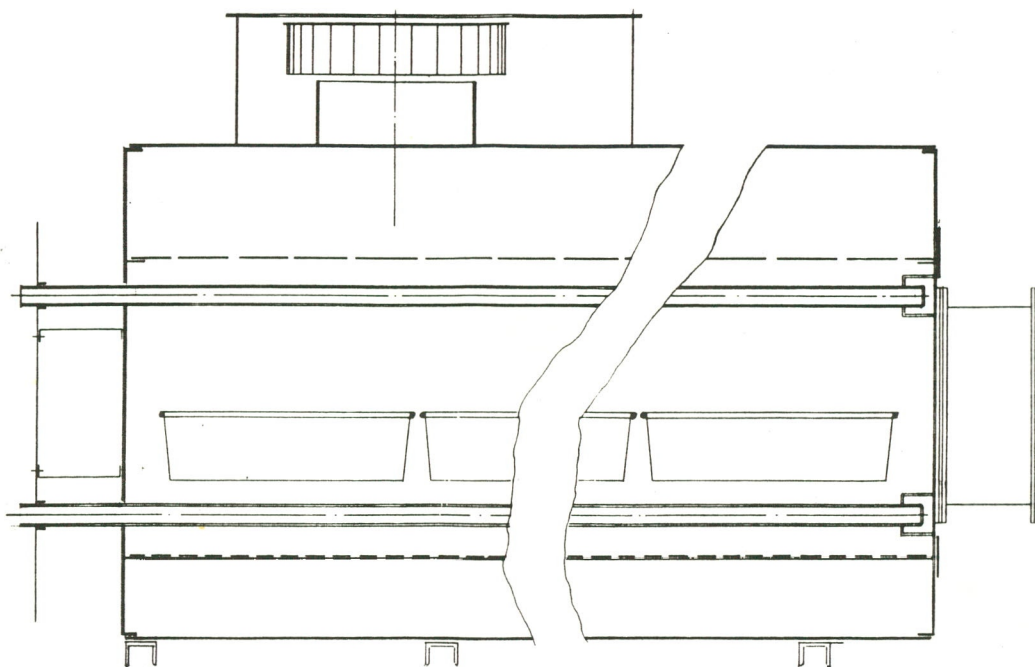
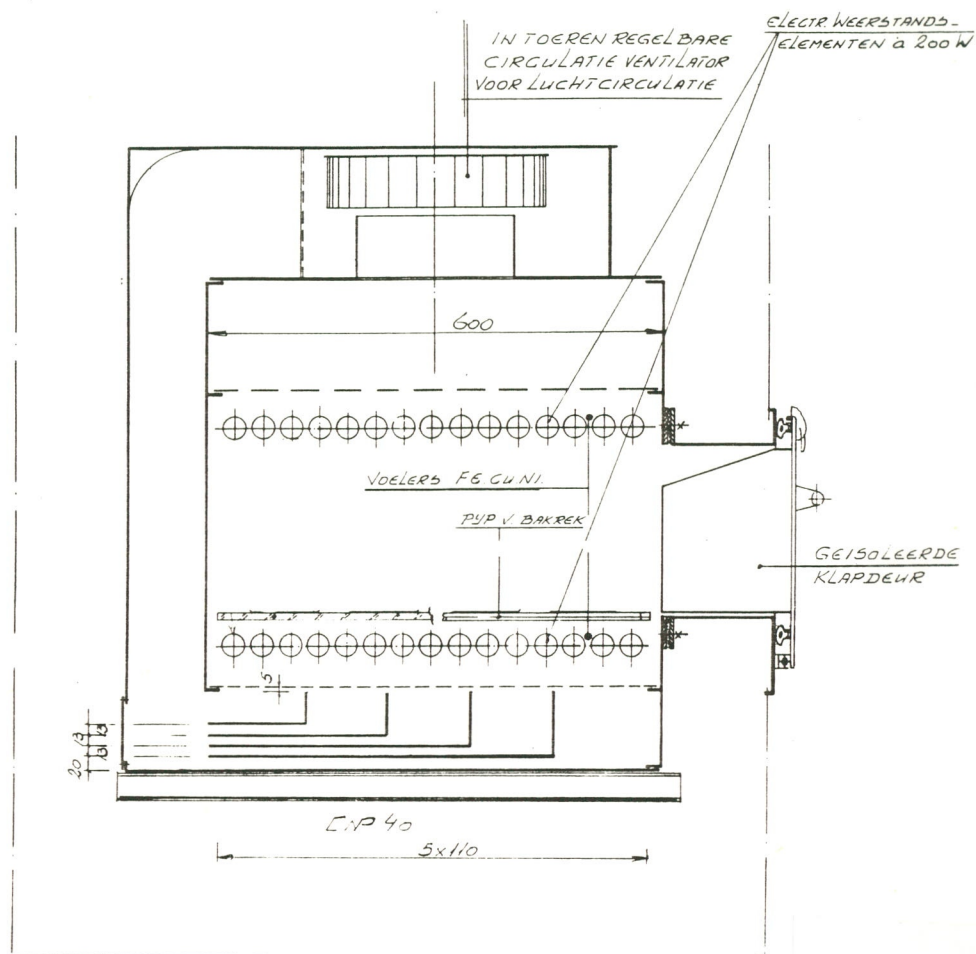
		met convectie		zonder convectie	
T kruin/vloer	°C	230/210	230/210	230/260	230/260
T dauwpunt	°C	90	70	90	70
datum		inbakverlies (gr)¹⁾		inbakverlies (gr)¹⁾	
17/01/91		125.8	129.3	101.0	107.2
18/01/91		121.5	126.5	104.5	99.2
gemiddeld		123.7	127.9	102.8	103.2
theoretisch opgenomen warmte (kJ)		447	456	401	402

¹⁾ gemiddeld deeggewicht 908 gram

Figuren 1 tot en met 19

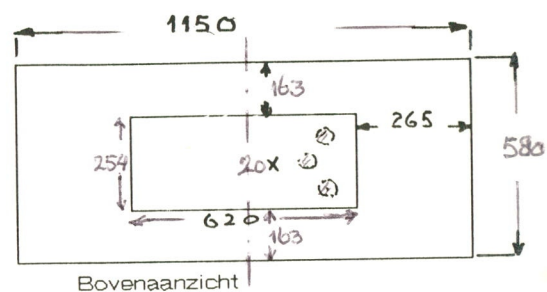
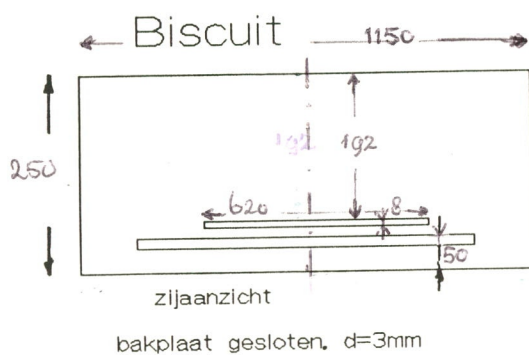
Figuur 1. De elektrische Becker oven.

zijaanzicht aan korte, respectievelijk lange zijde.

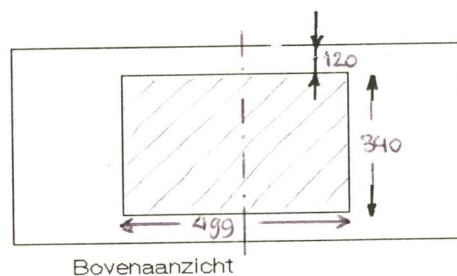
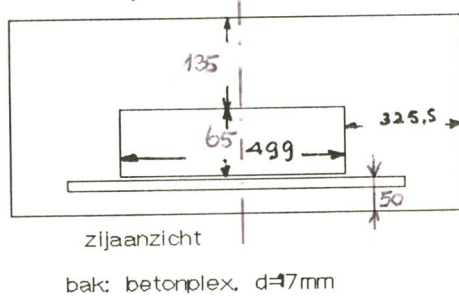


Figuur 2. De opstelling van de producten in de bakruimte.

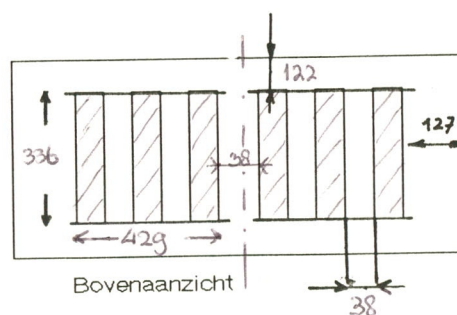
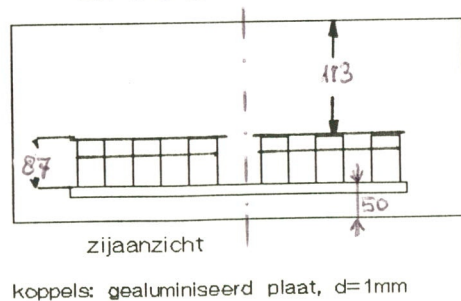
maten in mm



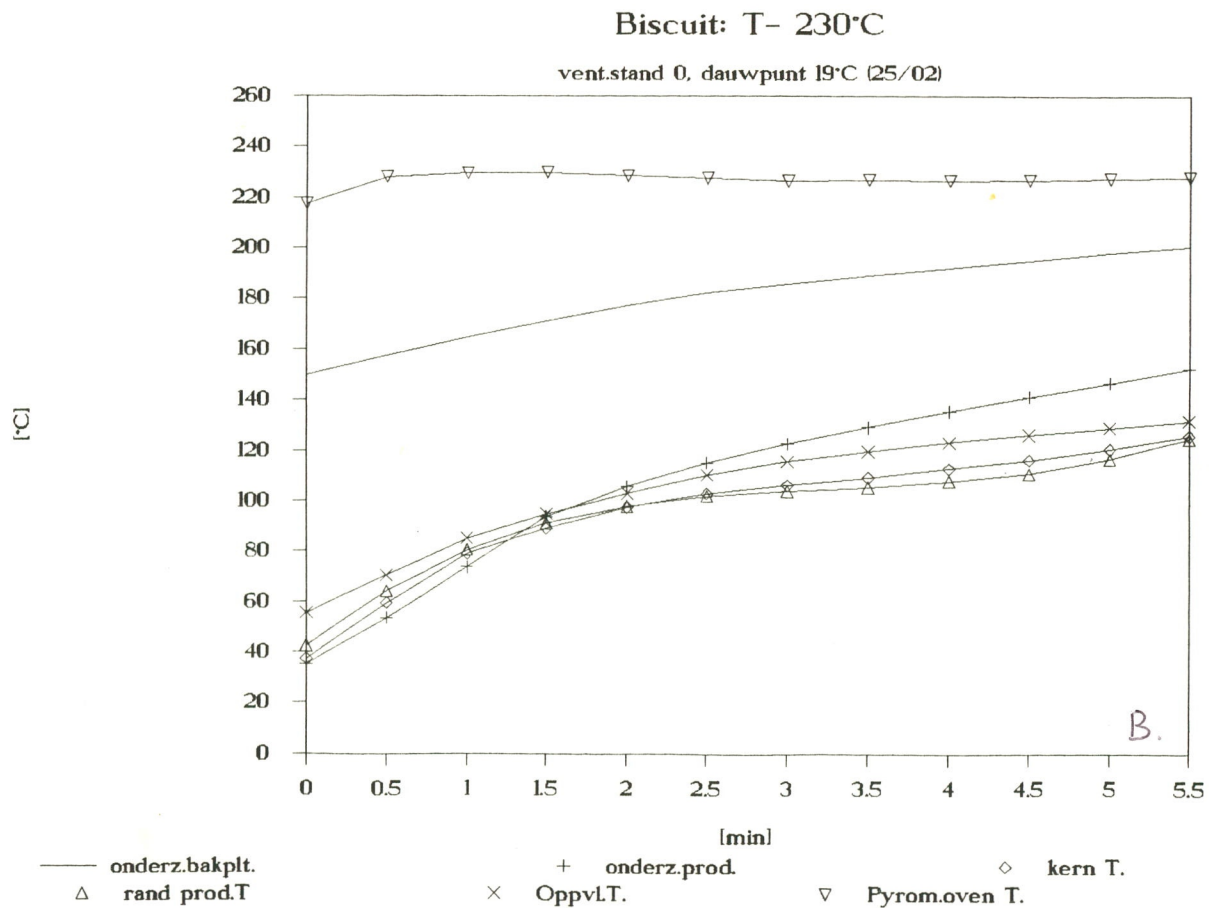
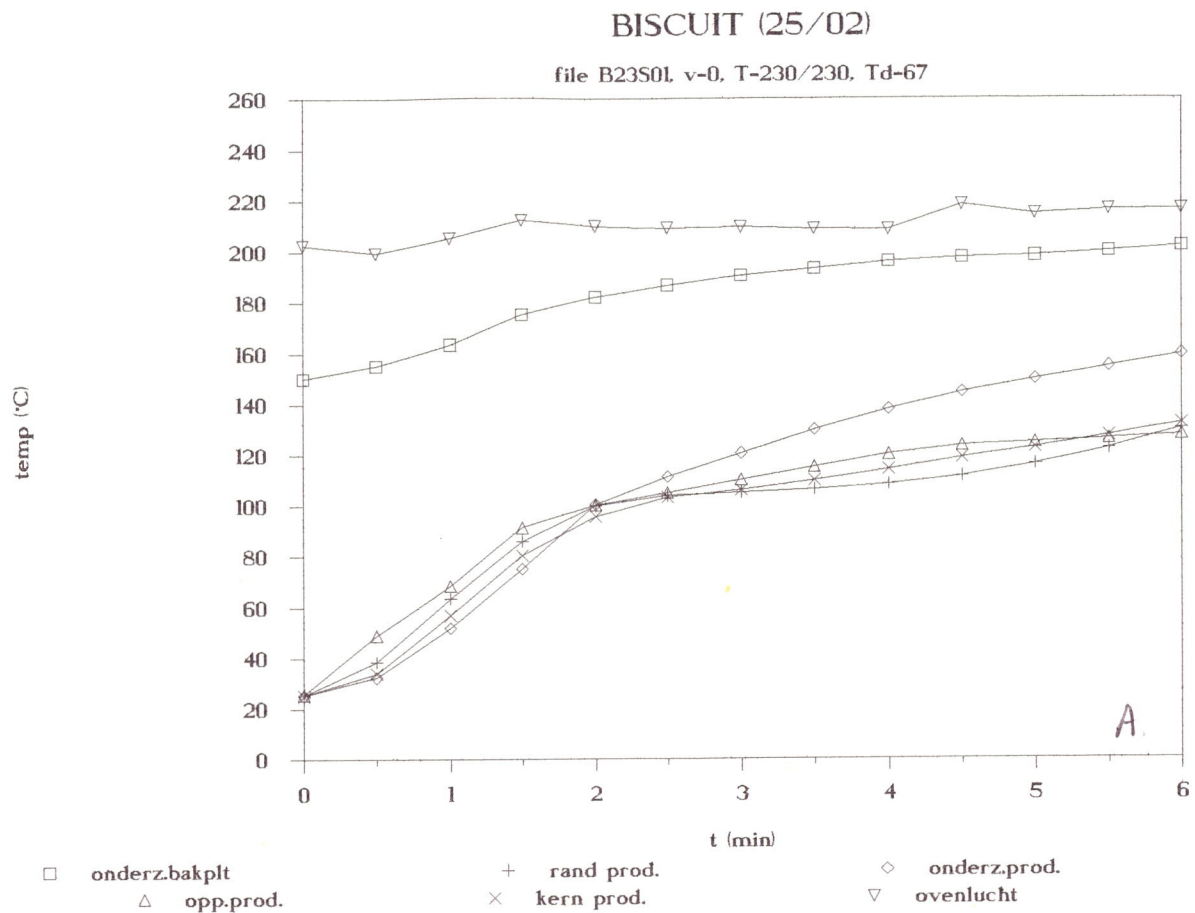
Ontbijtkoek



Brood

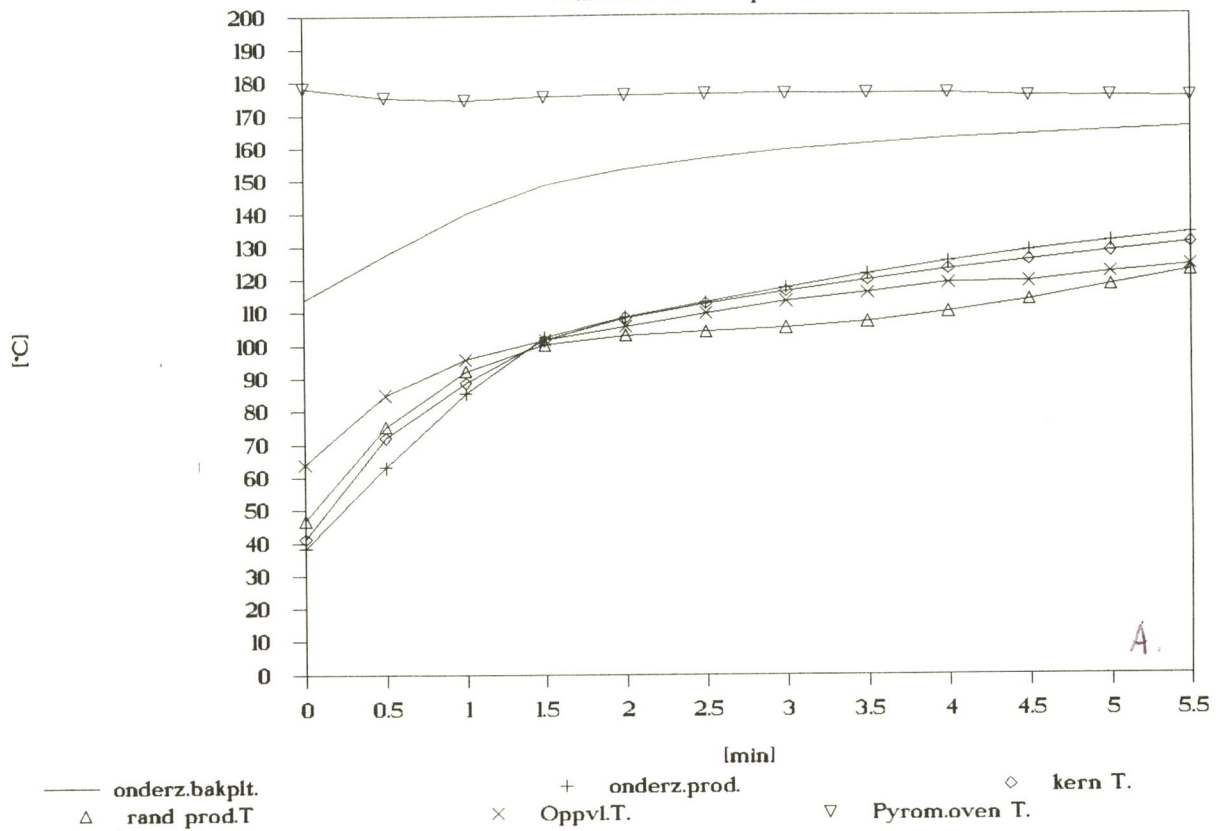


Figuur 3.



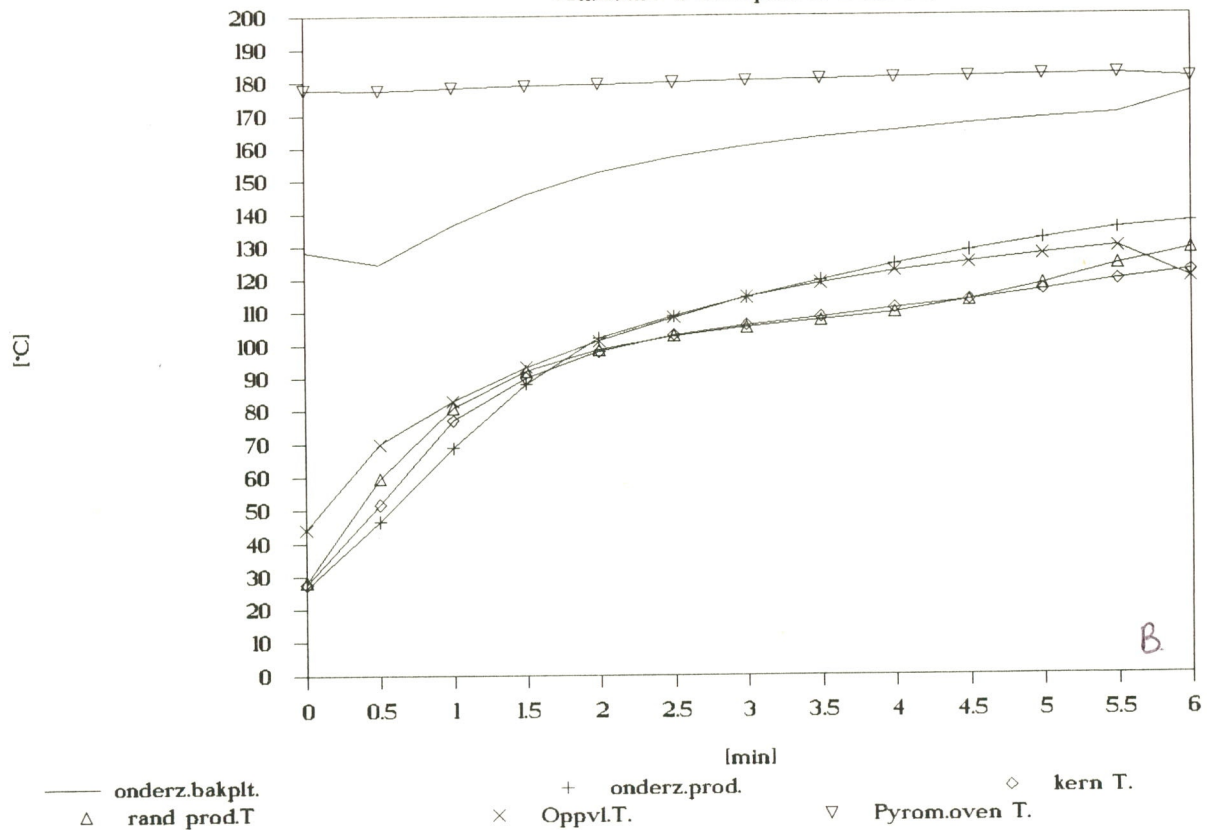
Biscuit: T- 180°C

vent.stand 4, dauwpunt 66°C (25/02)

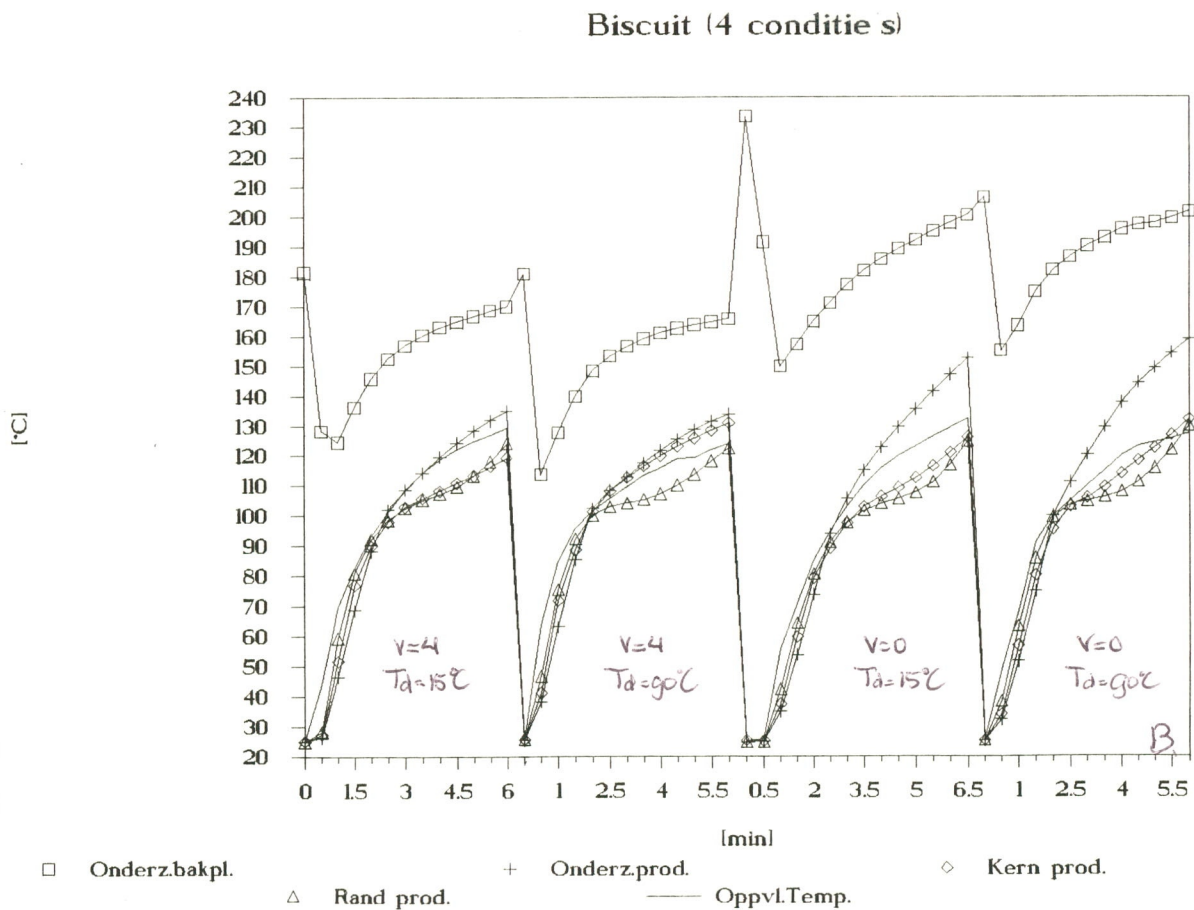
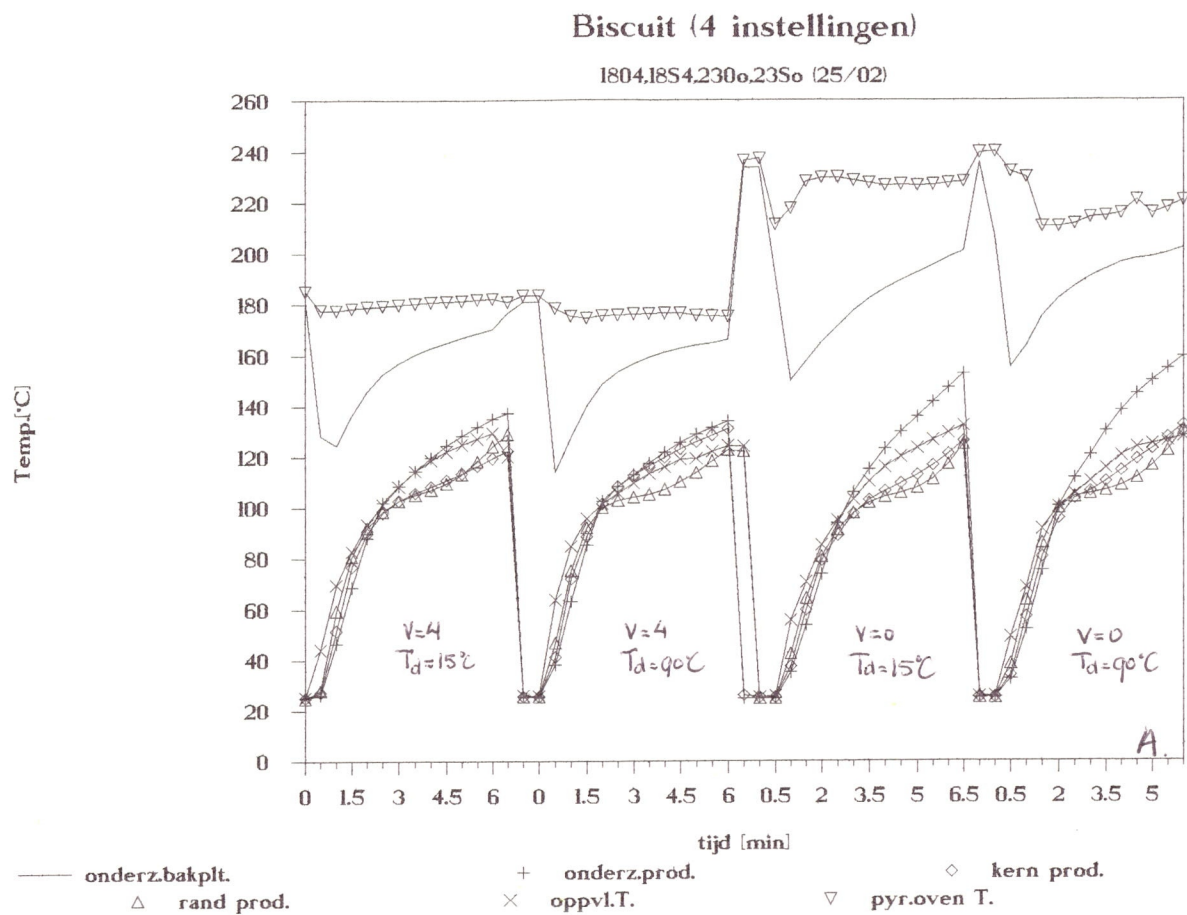


Biscuit: T- 180°C

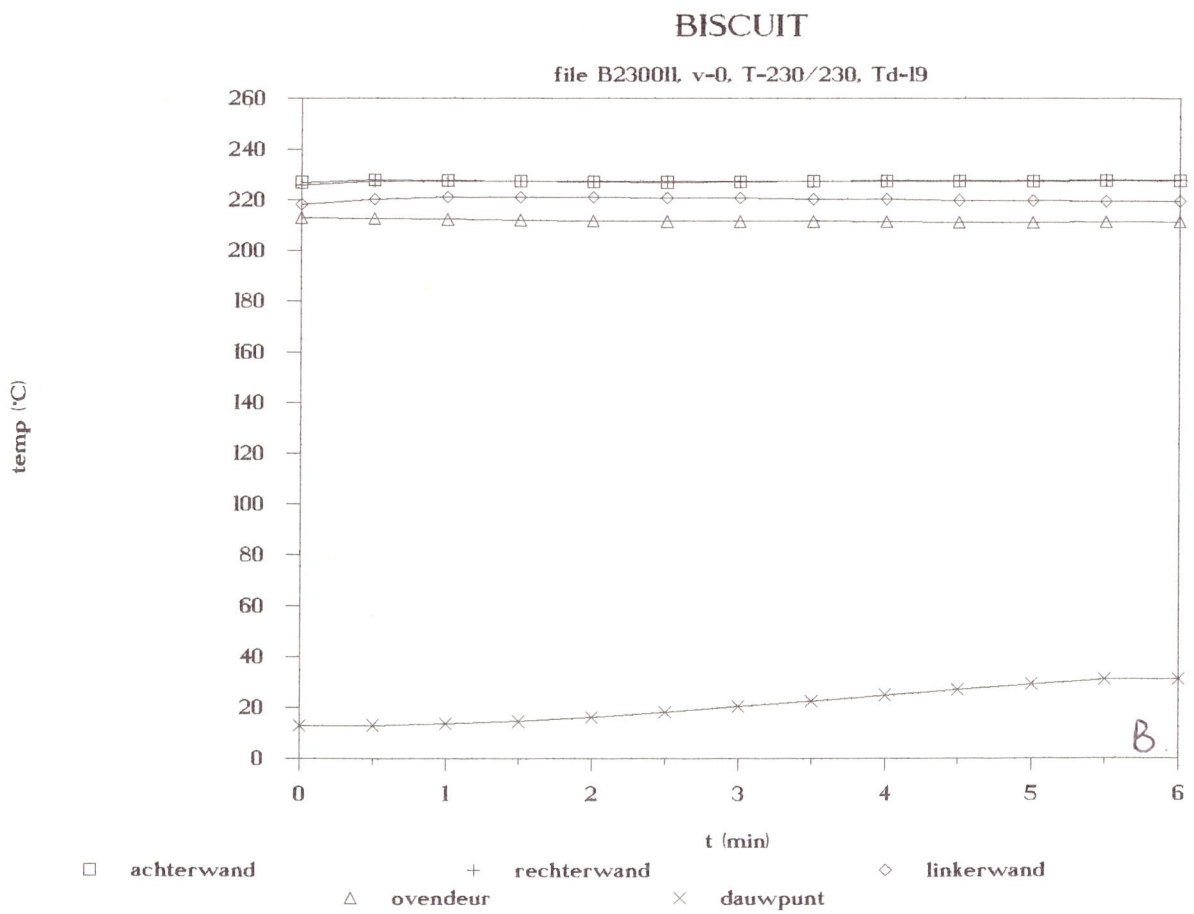
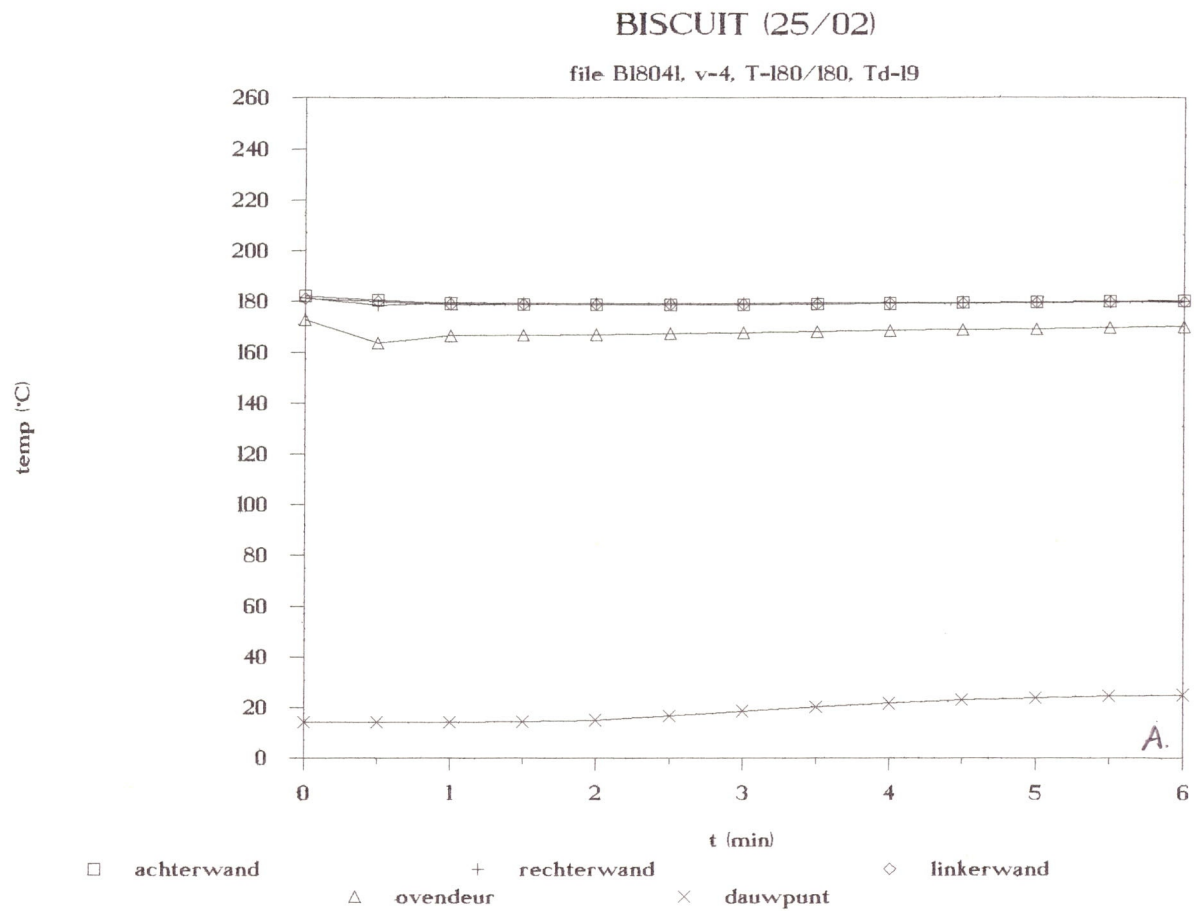
vent.stand 4, dauwpunt 19°C (25/02)



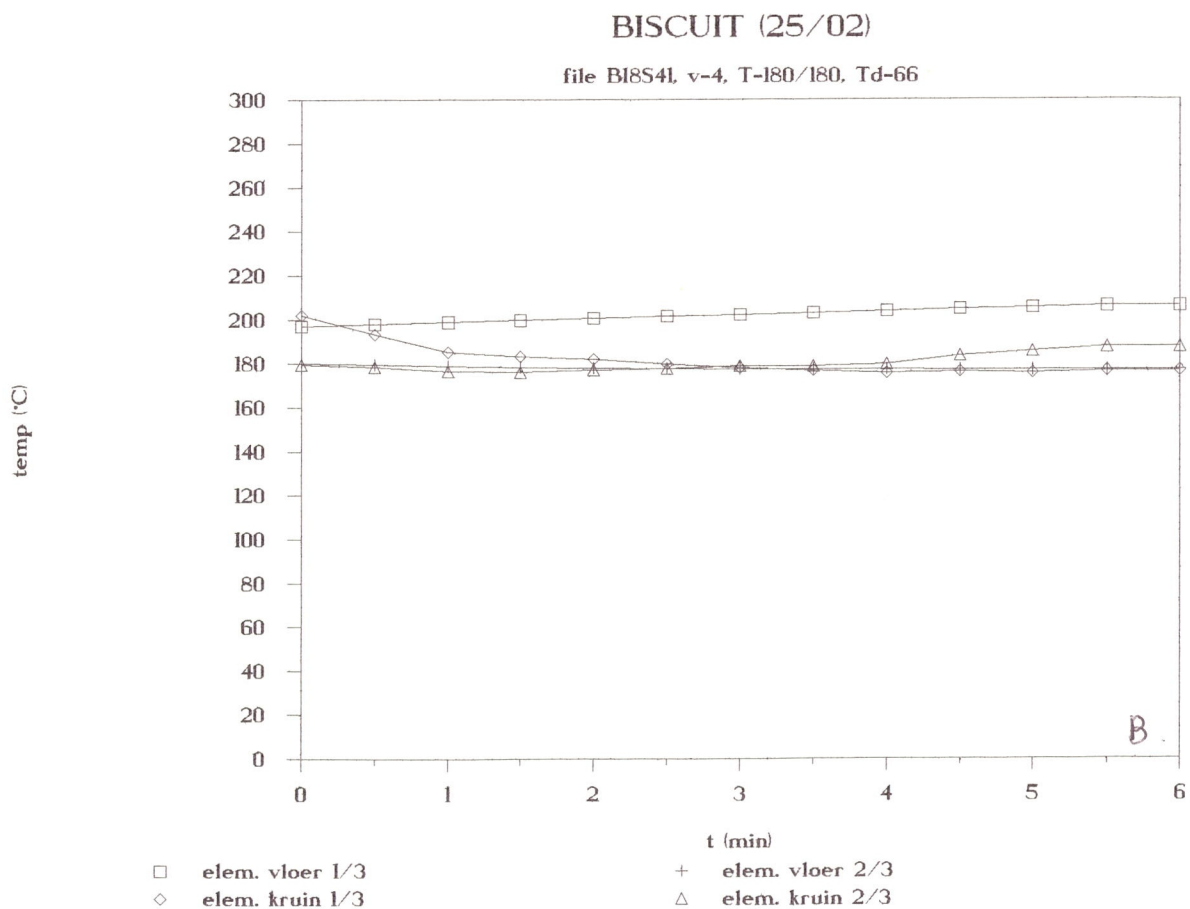
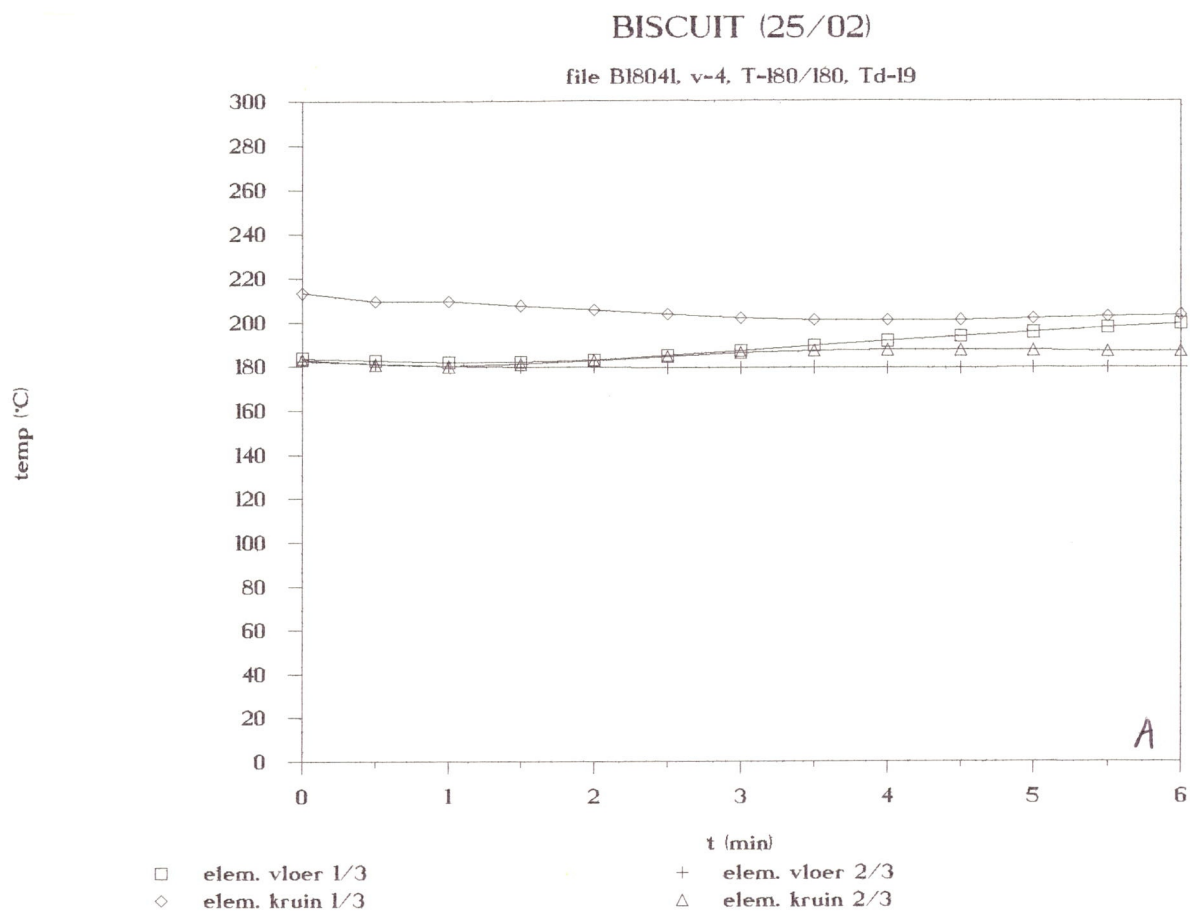
Figuur 5.



Figuur 6.

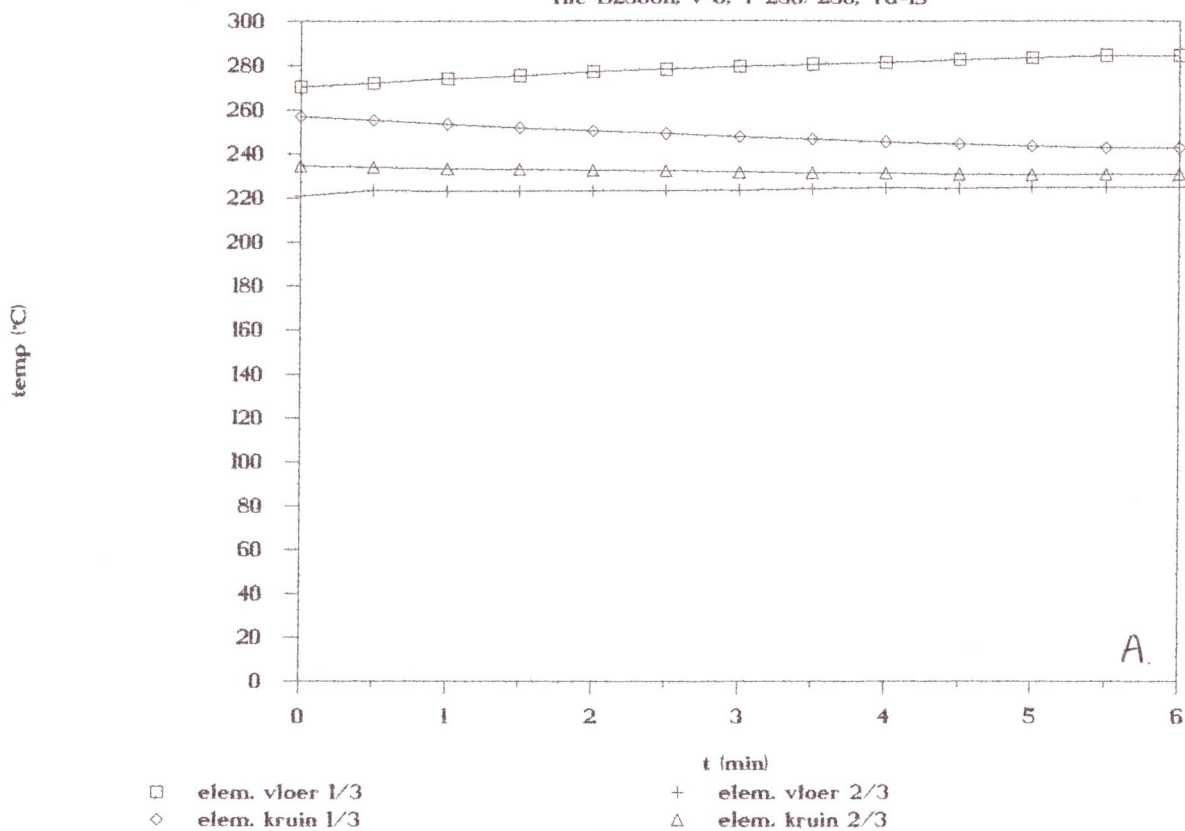


Figuur 7.



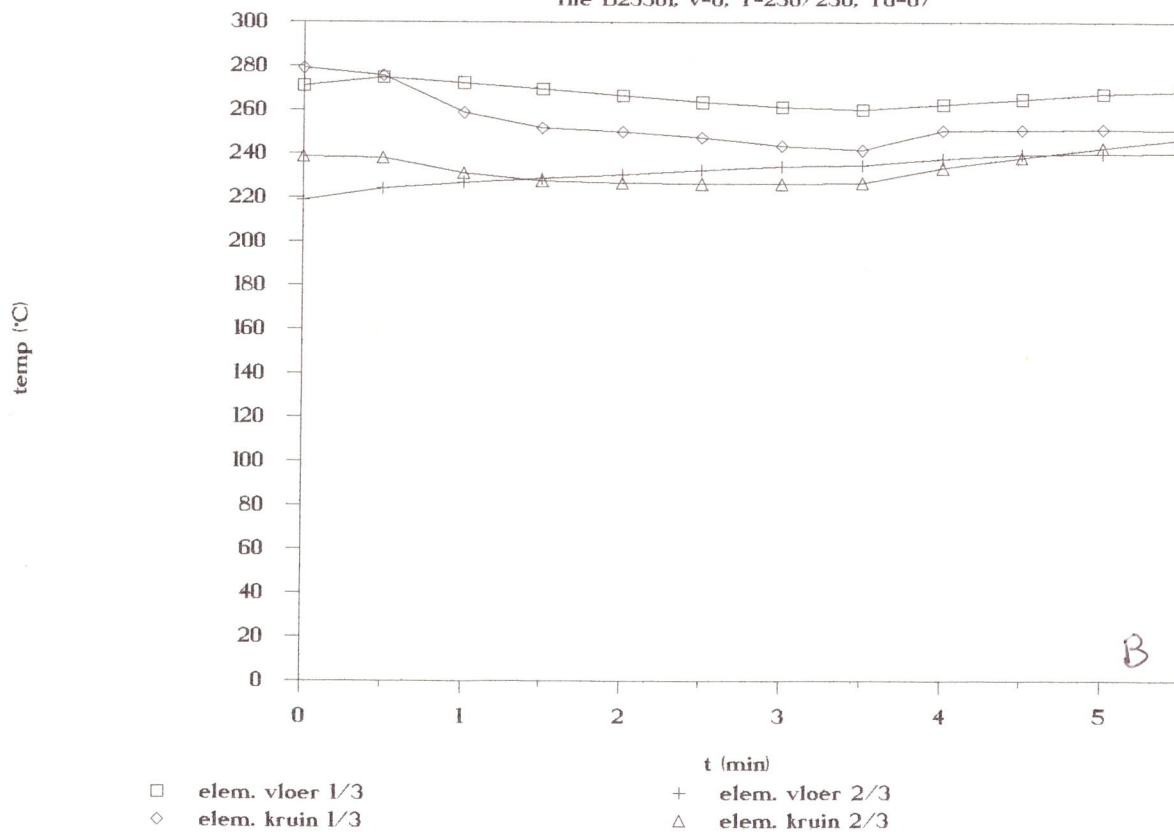
BISCUIT (25/02)

file B23001L, v=0, T=230/230, Td=19

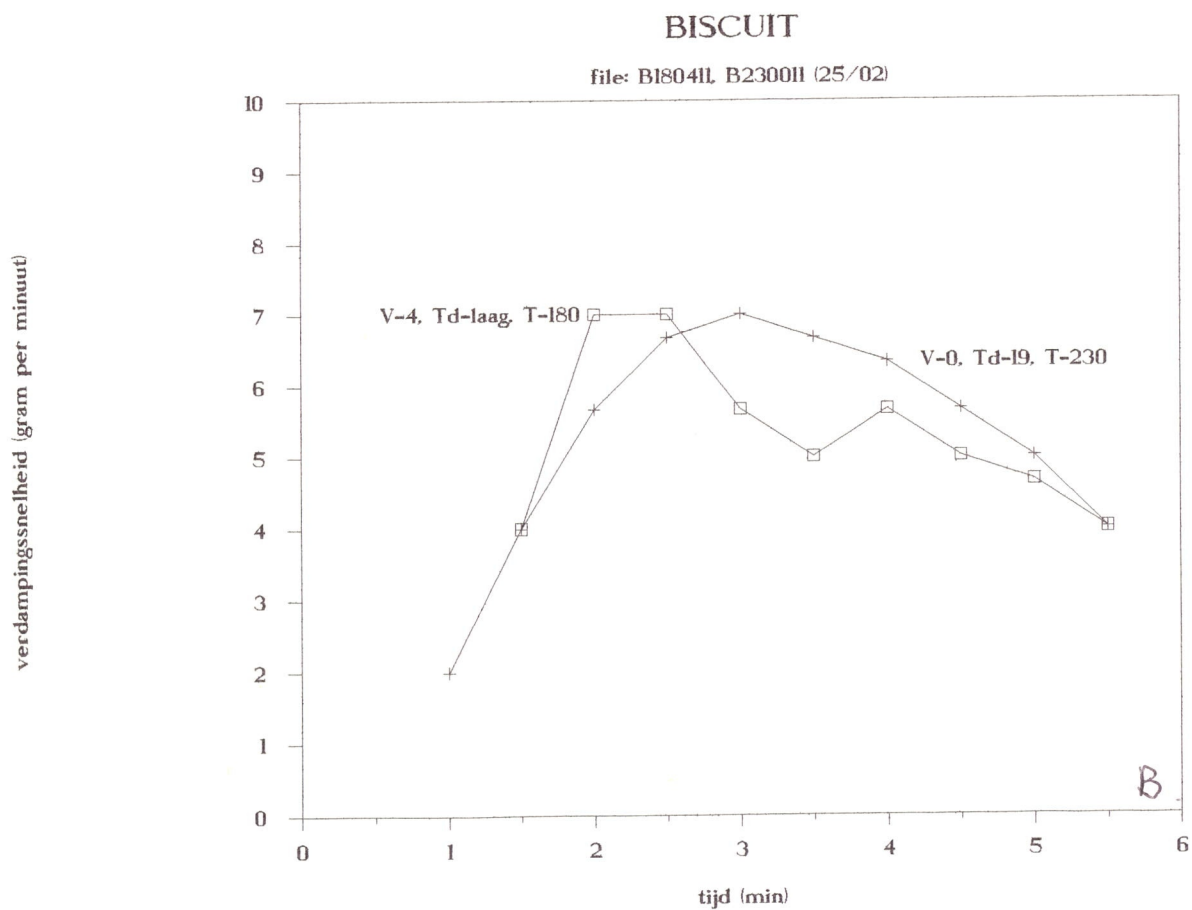
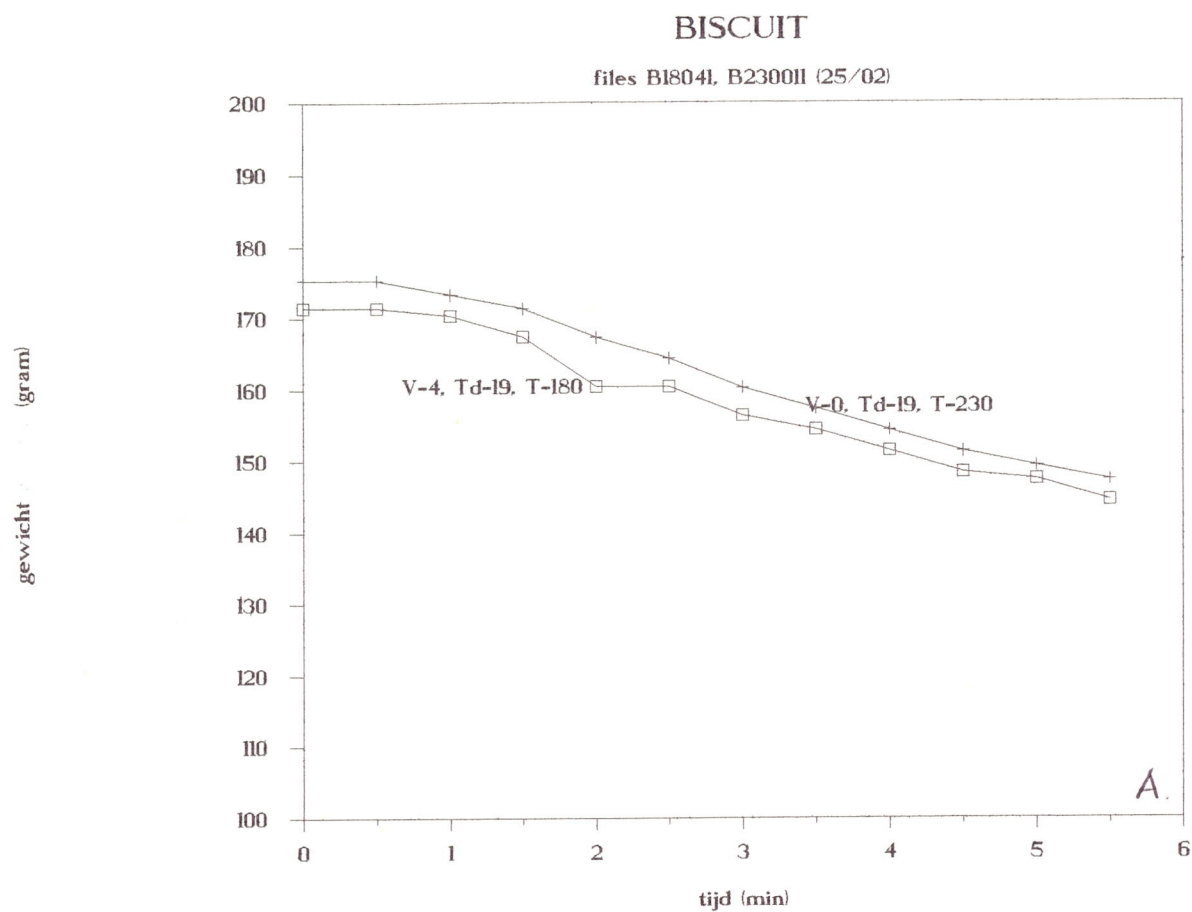


BISCUIT (25/02)

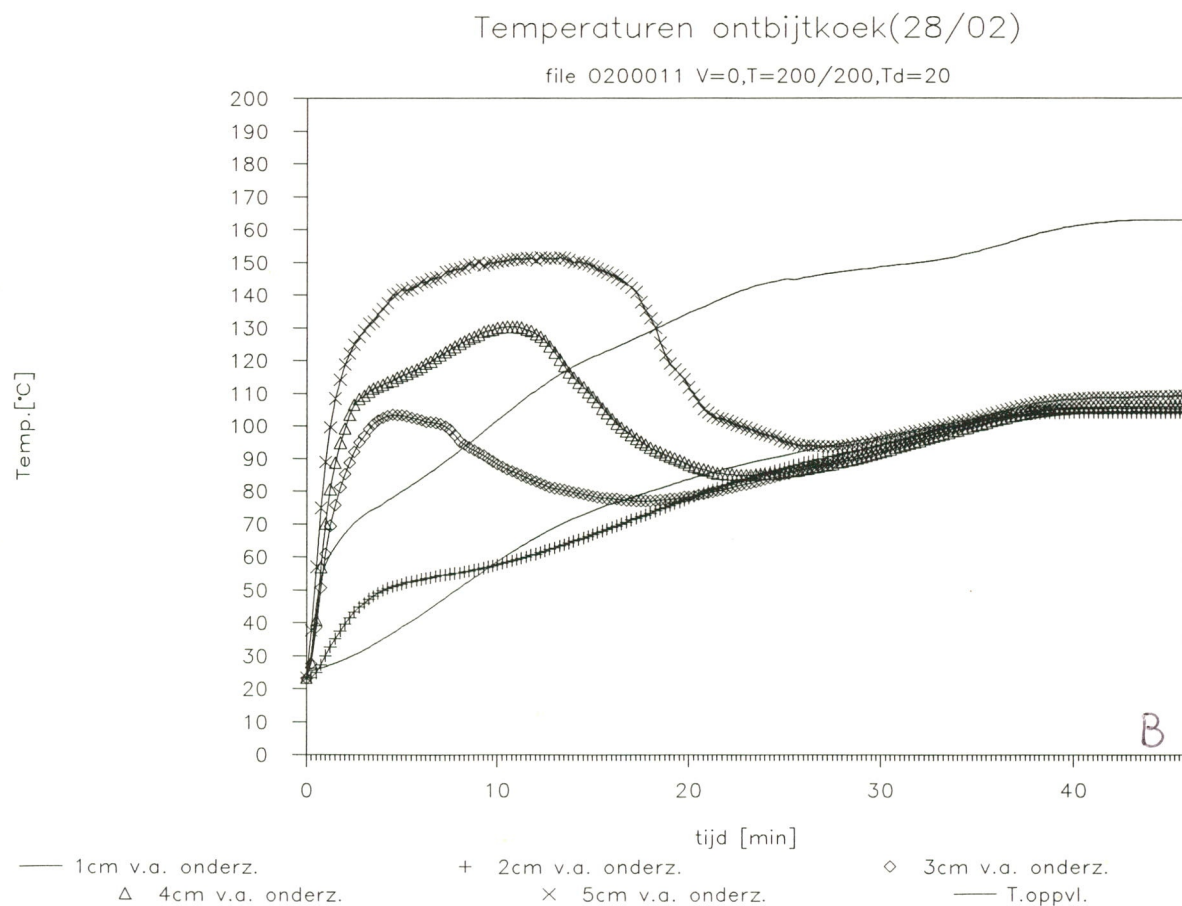
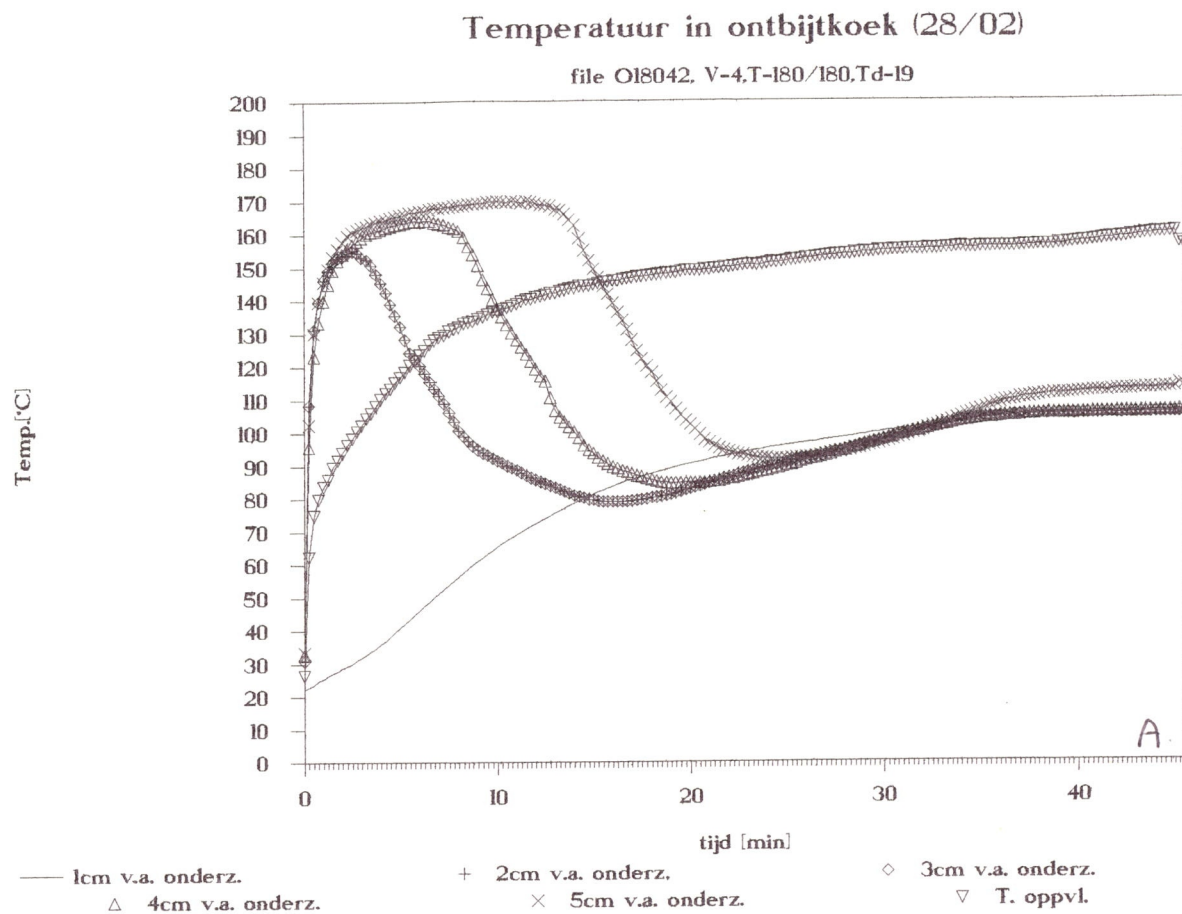
file B23501L, v=0, T=230/230, Td=67



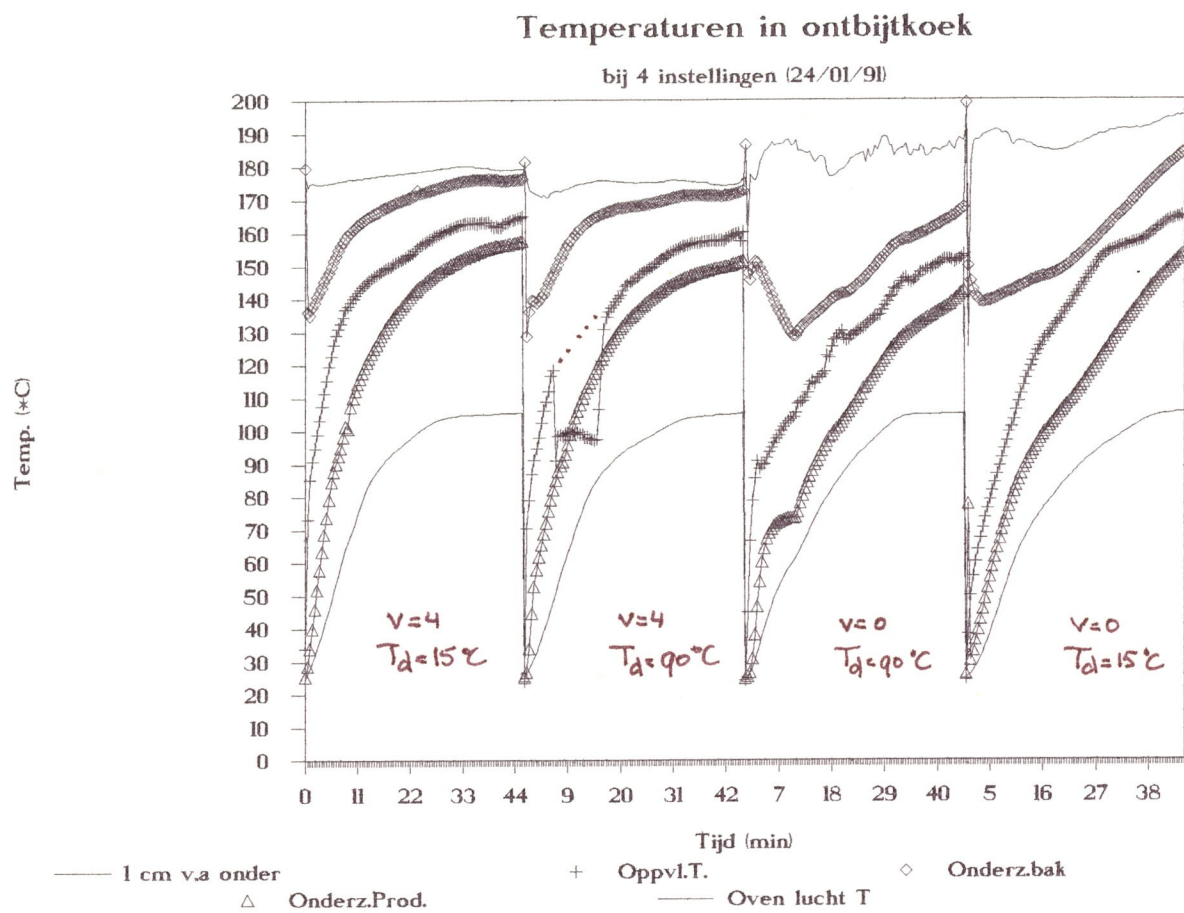
Figuur 9.



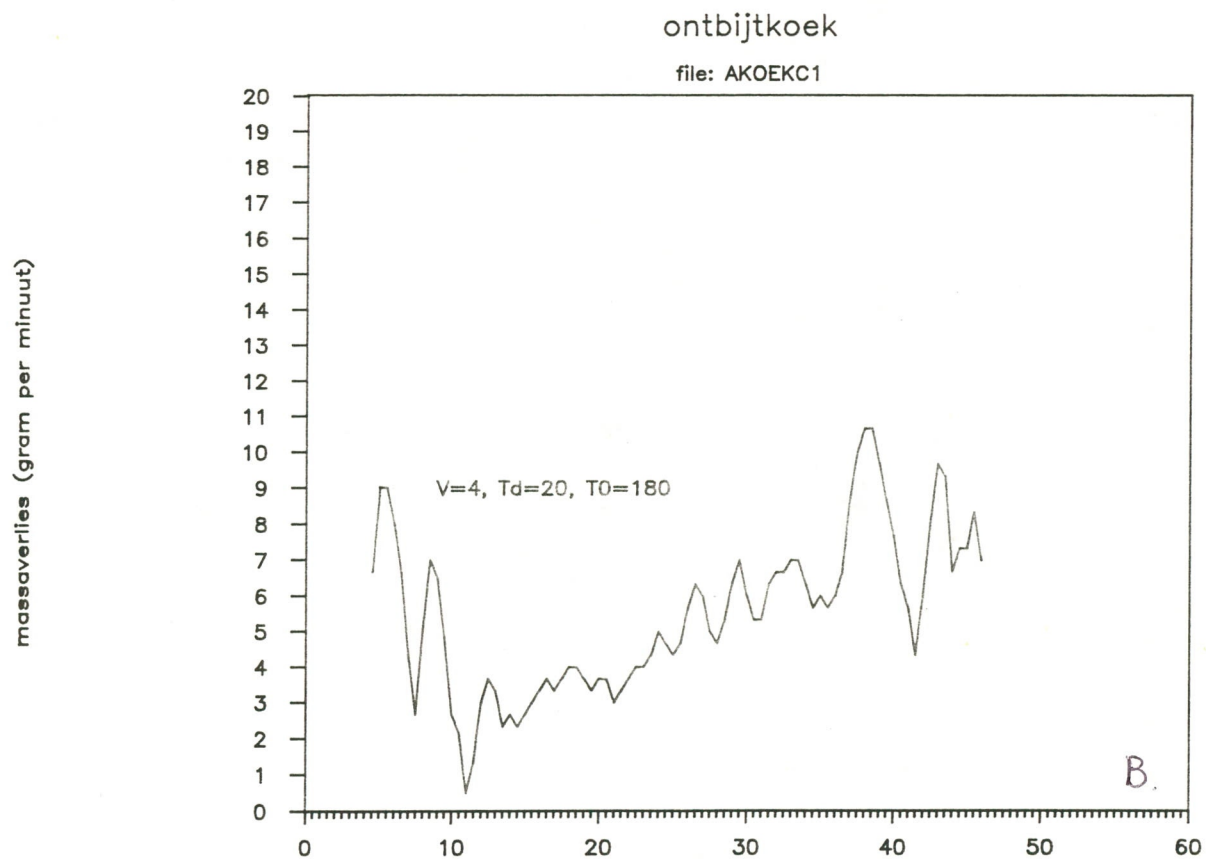
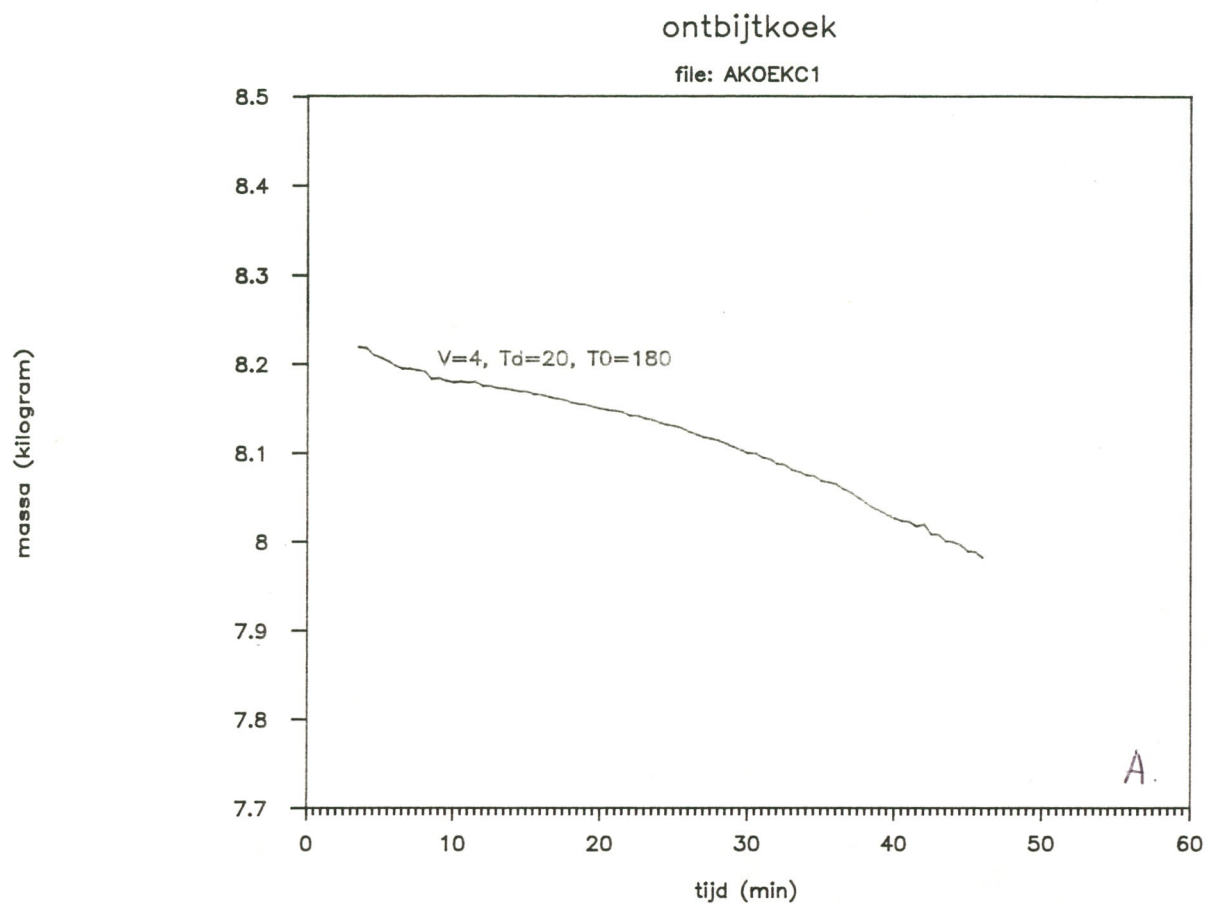
Figuur 10.



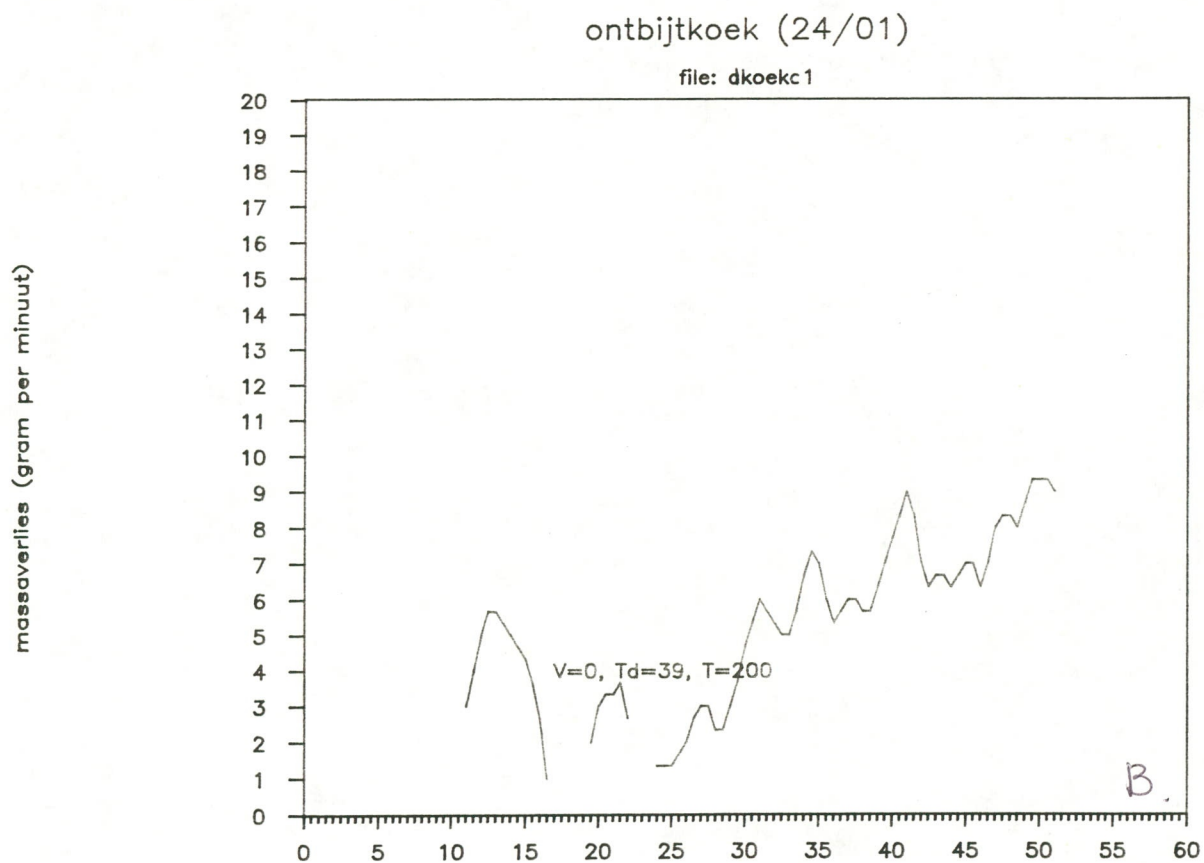
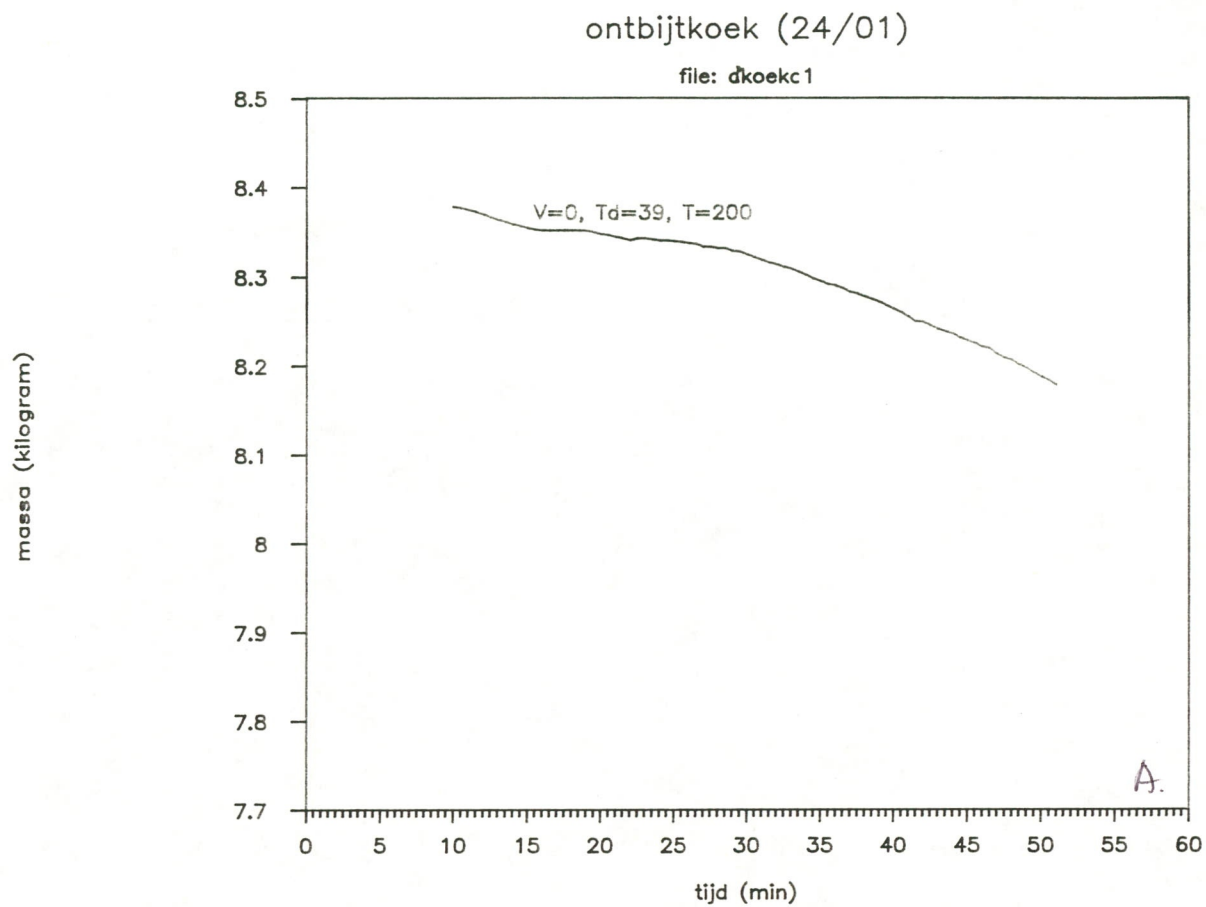
Figuur 11.



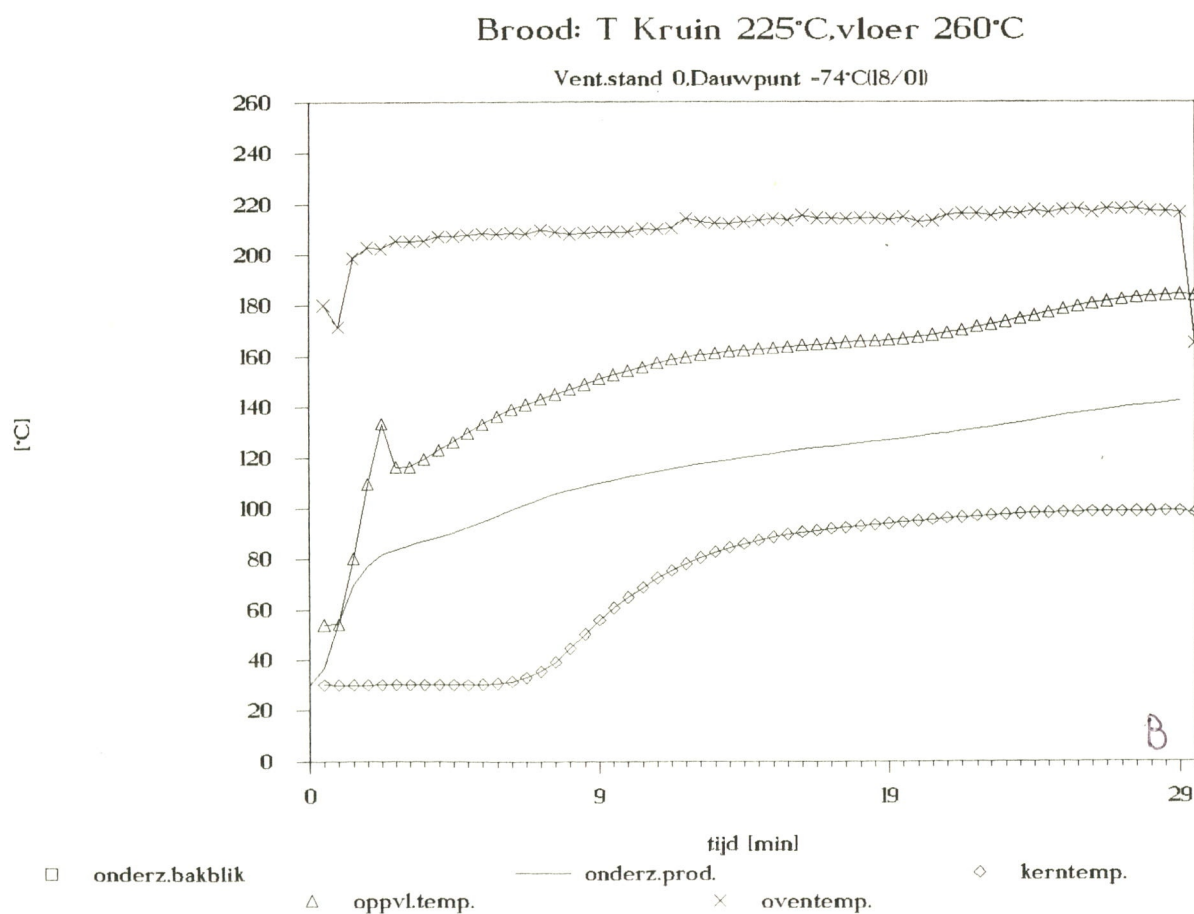
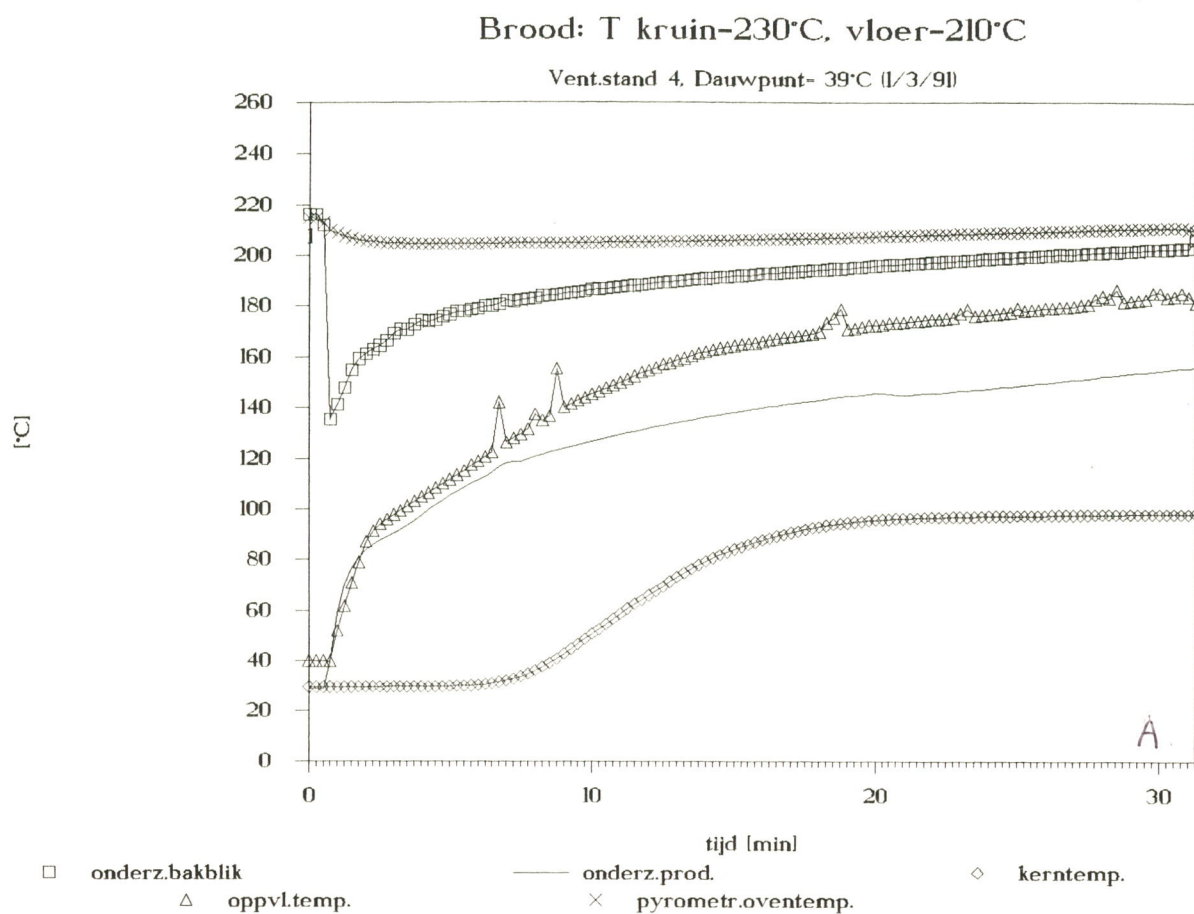
Figuur 12.



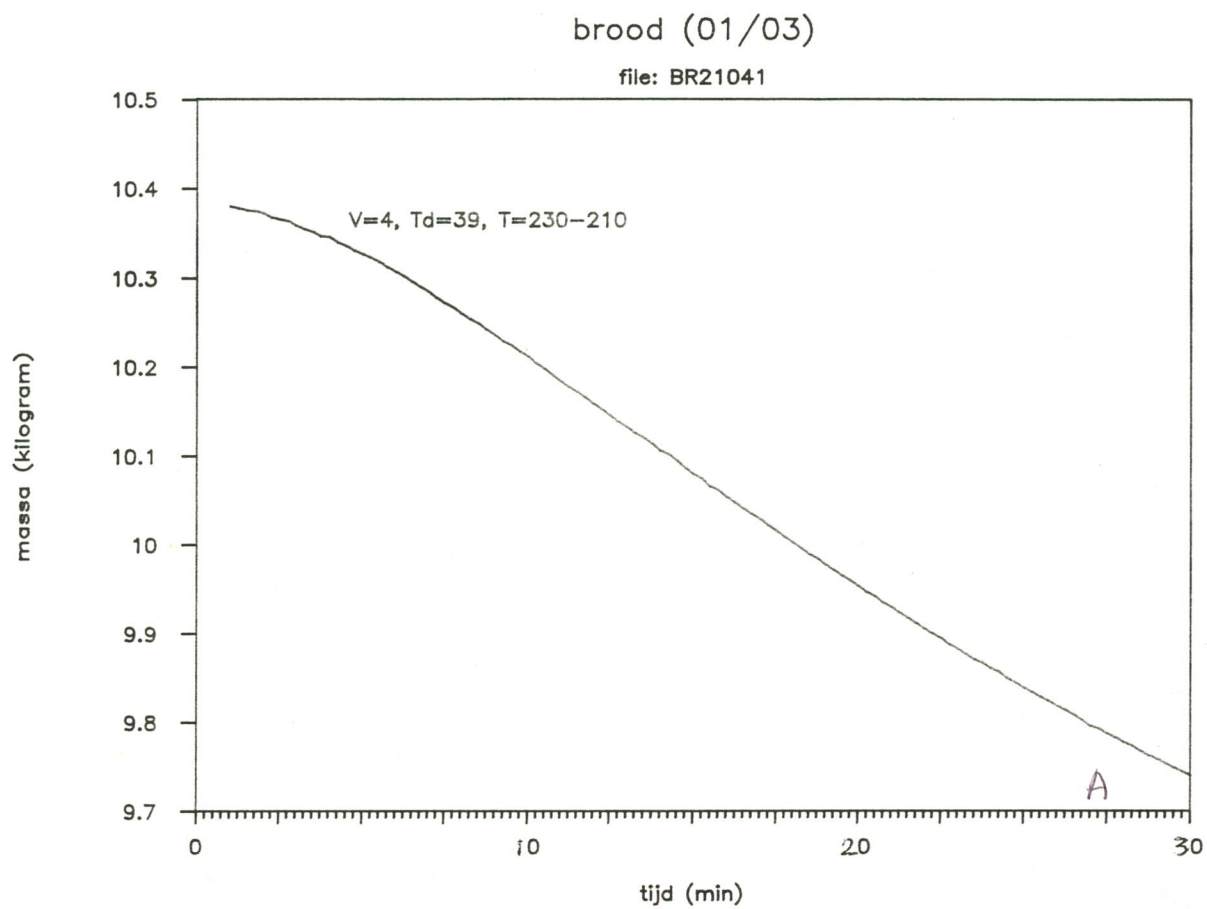
Figuur 13.



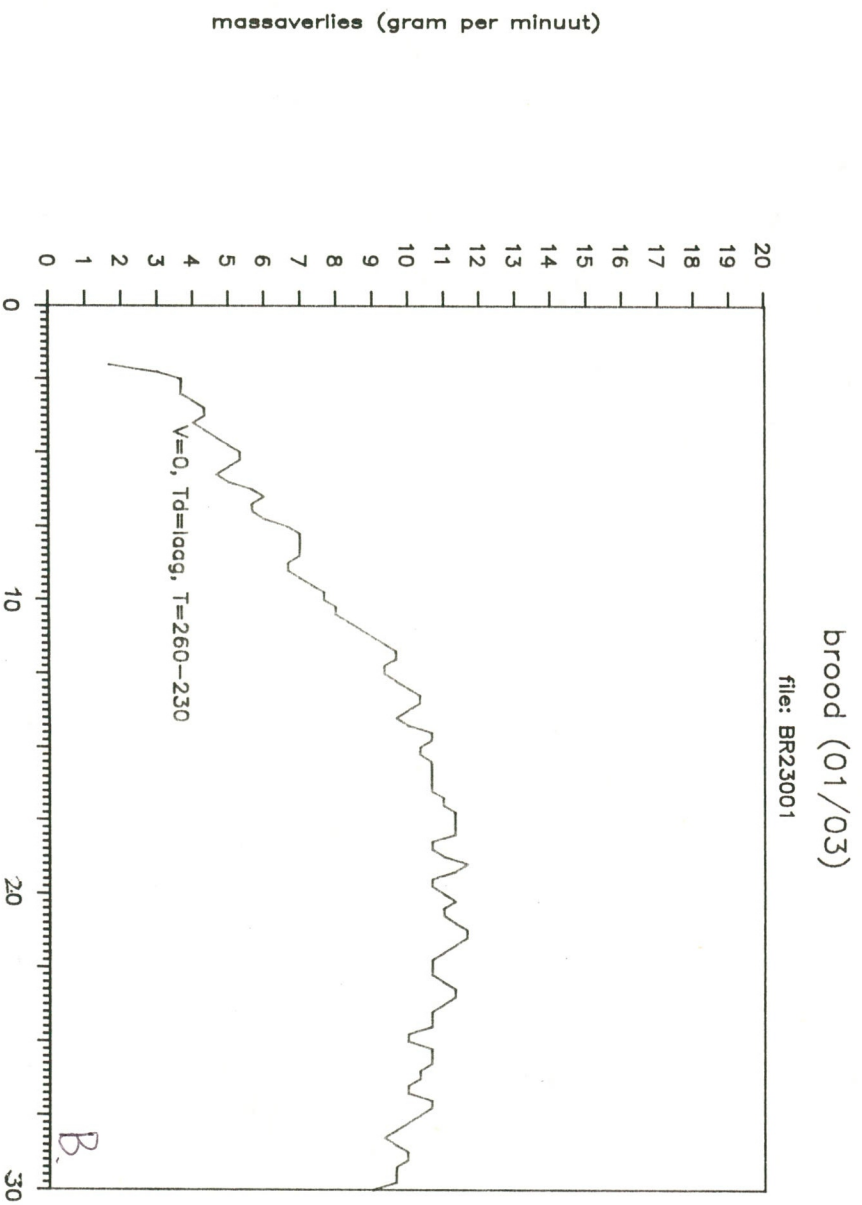
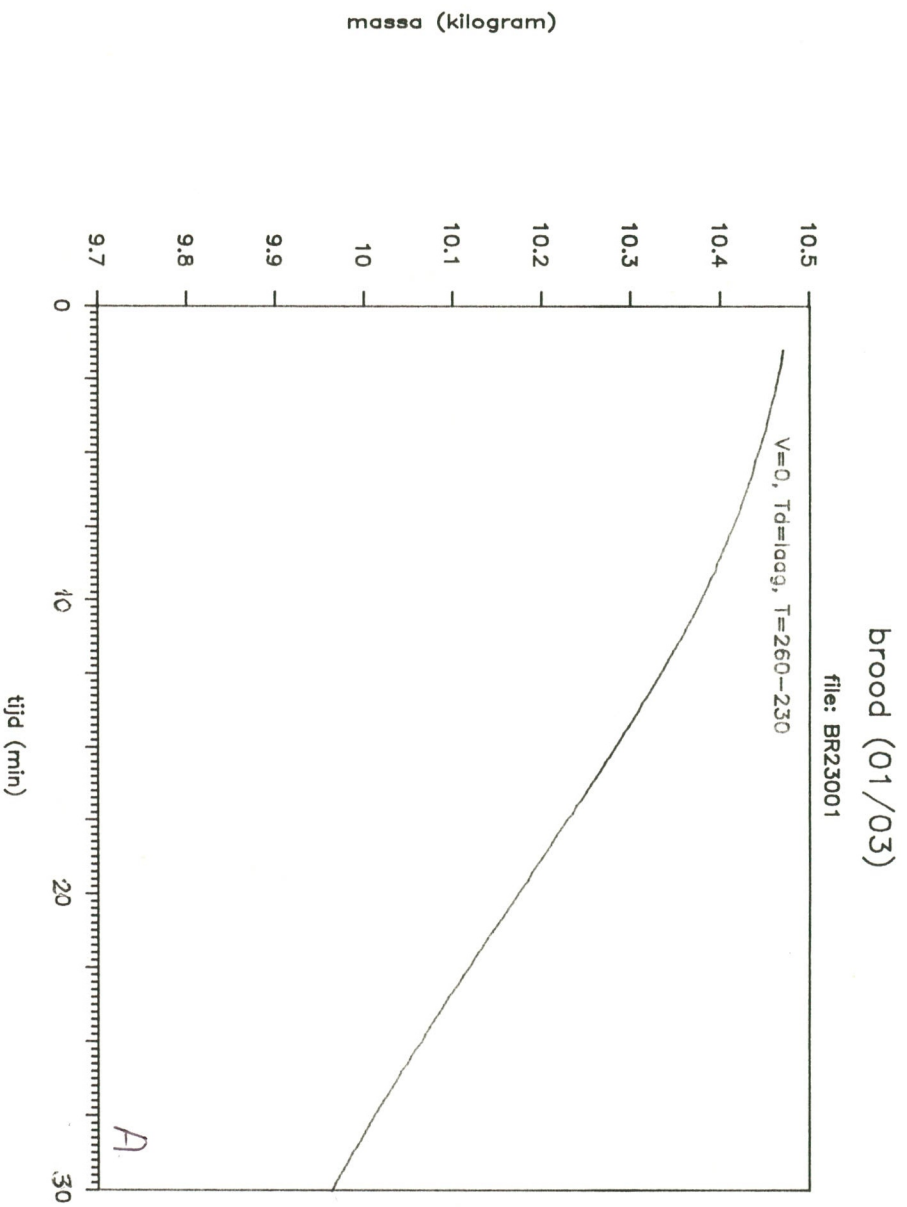
Figuur 14.



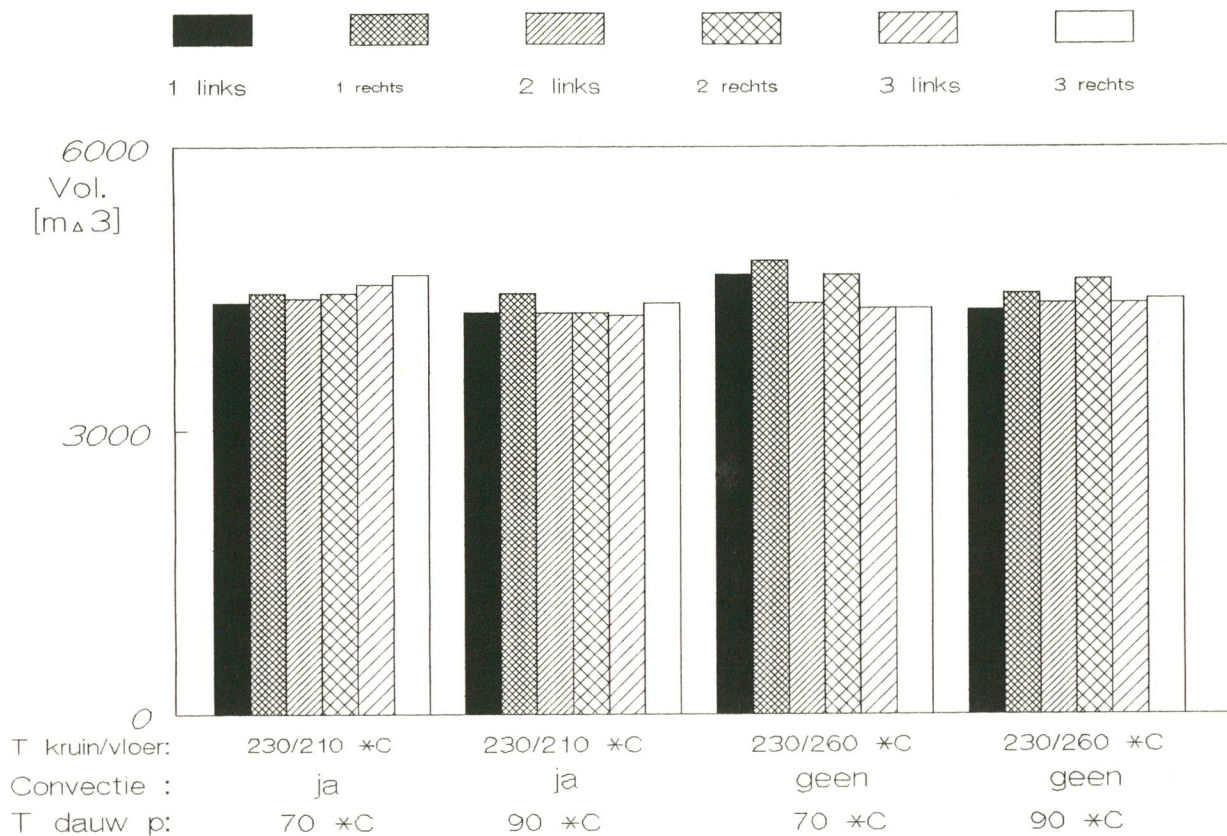
Figuur 15.



Figuur 16.



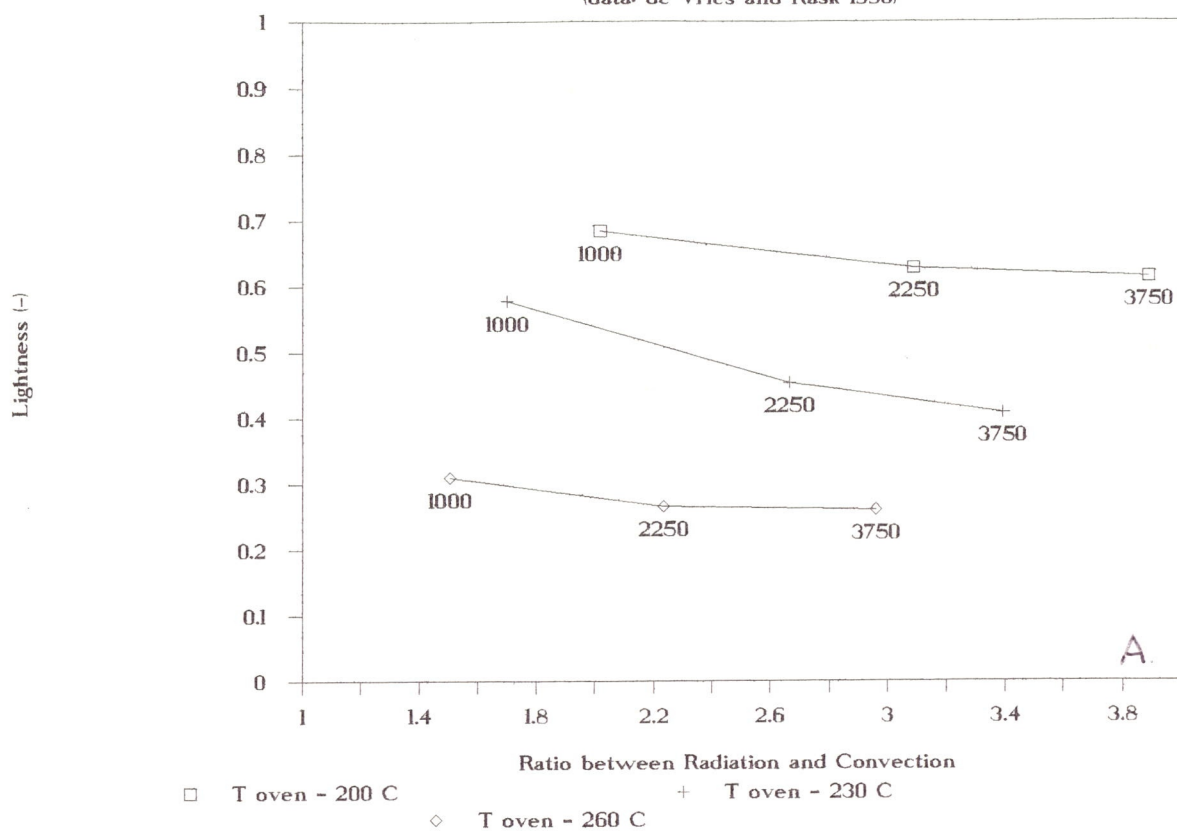
Figuur 17. Broodvolume als functie van de bakconditie's.



figuur 18.

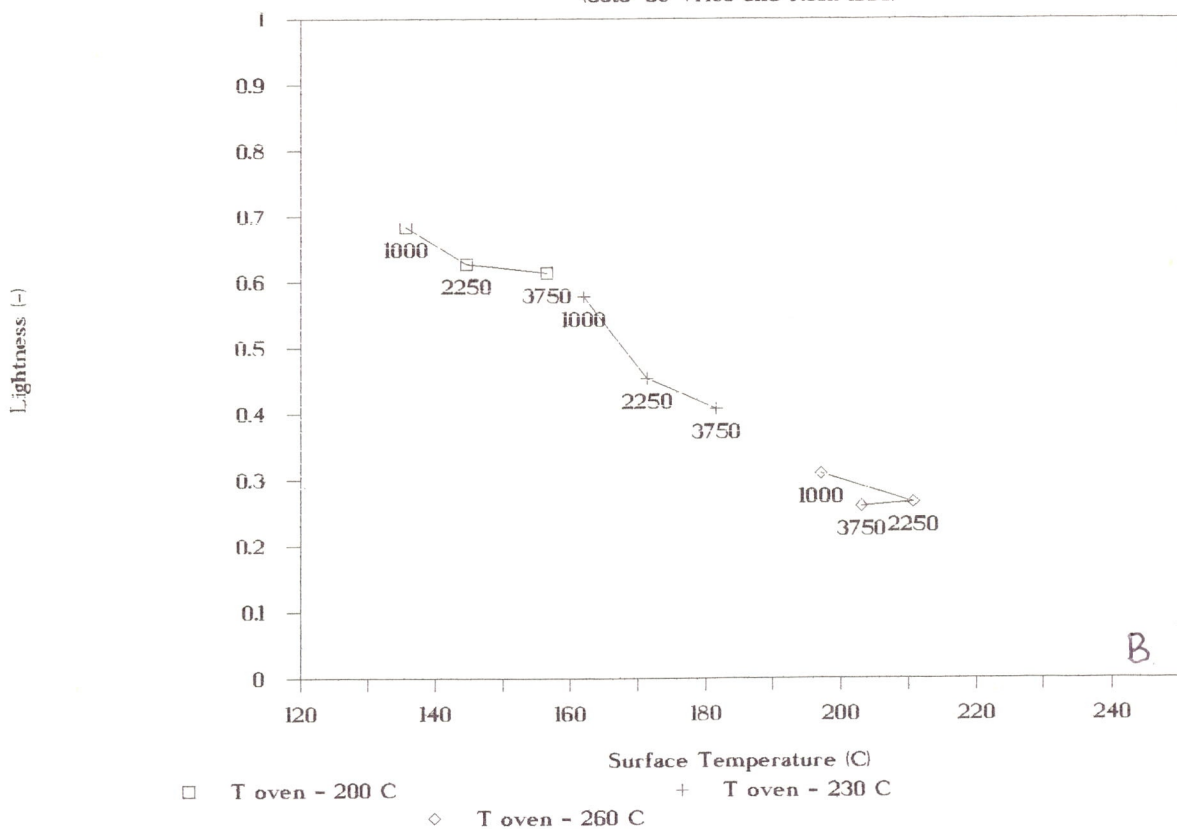
Oven Conditions and Lightness of Crust

(data: de Vries and Rask 1990)

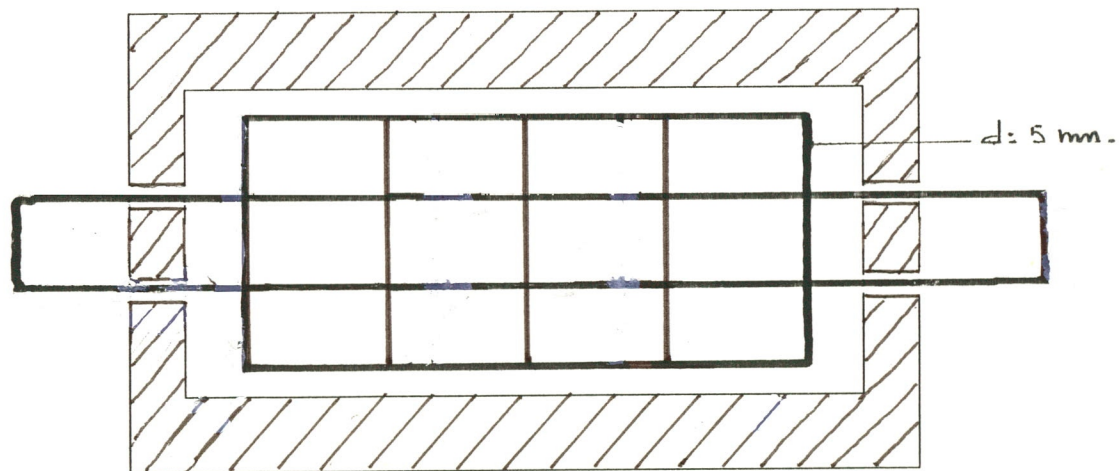
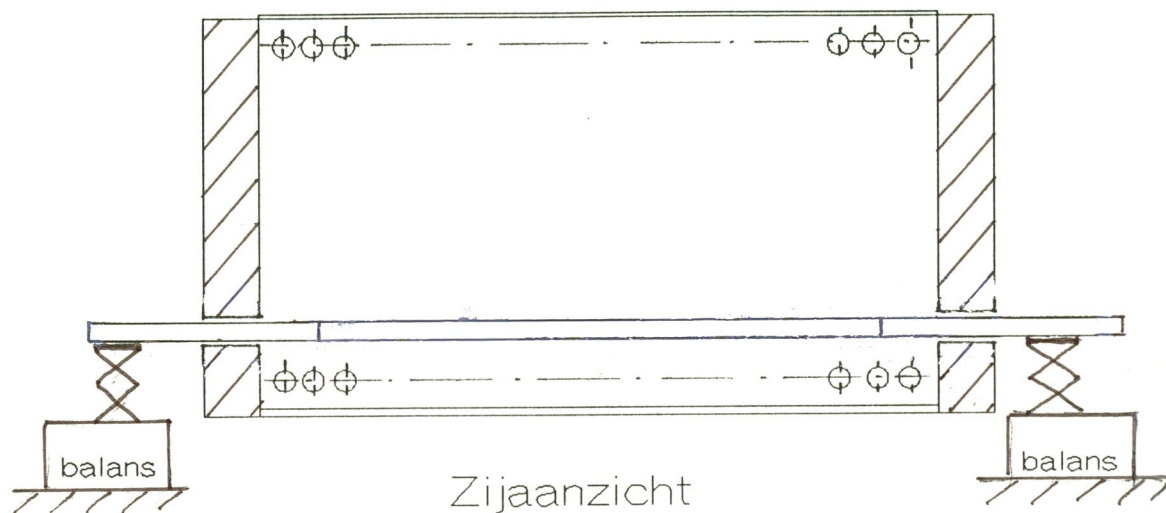


Oven Conditions and Lightness of Crust

(data: de Vries and Rask 1990)



Figuur 19. Schematische weergave van het weegplateau in de bakruimte.



Bovenaanzicht

*Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood***Bijlage 1 Receptuur van de bakprodukten**

De volgende receptuur is toegepast:

		Biscuit	Ontbijtkoek	Brood
bloem	(gram)	1000	1500	3500
vet	(gram)	170	75	70
suiker	(gram)	300		35
stroop	(gram)	40	1650	
zouten	(gram)	20.9	60	70
gist	(gram)			175
koekkruiden	(gram)	0	33	
biscuitkruiden	(gram)	75		
water	(gram)	184.9	525	1995
totale deeggewicht	(gram)	1791	3843	5845
vochtgehalte deeg	(%)	19.2	28.1	45.2
droge stof:				
soortelijke warmte	(kJ/kgK)	1.35	1.27	1.31
dichtheid	(kg/m ³)	702	656	661
deeg:				
soortelijke warmte	(kJ/kgK)	1.90	2.10	2.62
dichtheid	(kg/m ³)	761	756	819
aantal eenheden per bakproef		20 biscuits	1 bak koek	6 broden
deeggewicht per bakproef (gram)		174	3720	5450 ¹⁾

¹⁾ Bij de laatste serie proeven zijn kleinere broden gebakken
(4560 gram voor 6 broden)

Bijlage 2 **Foto's van de produkten, de bakruimte en de opstelling**

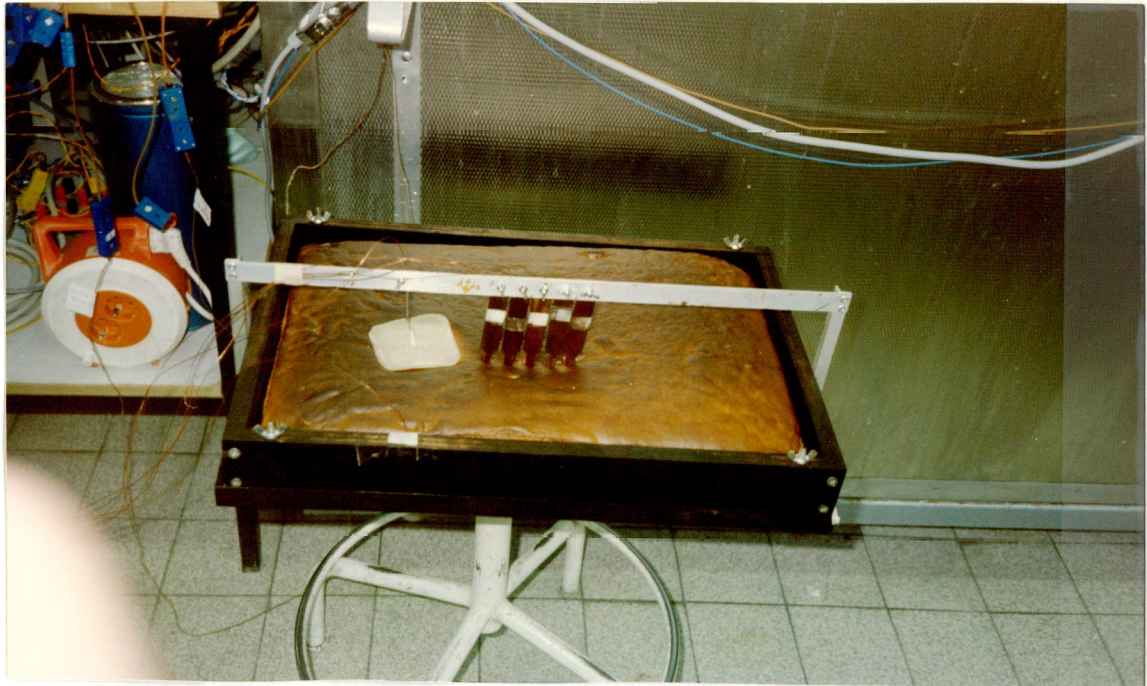


1 Met behulp van een rookgenerator kan een globaal beeld van de stroming verkregen worden.

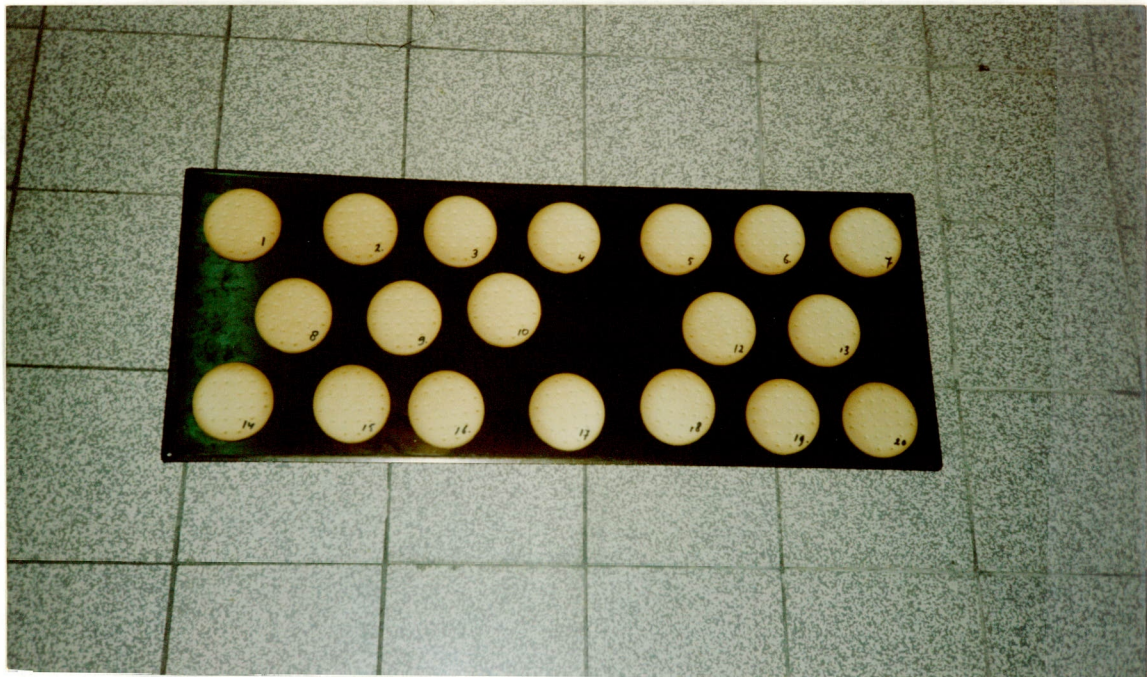


2 Twee koppels wit busbrood.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

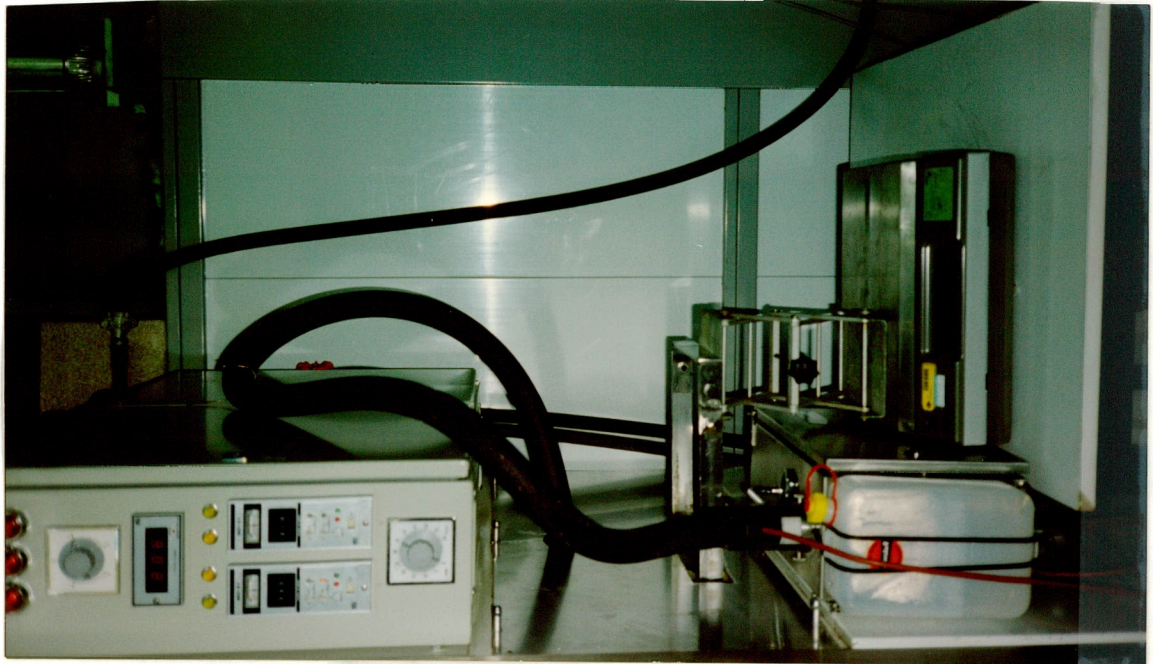


3 Ontbijtkoek met de 'thermokoppel-stokjes'.



4 Twintig biscuits op een gesloten bakplaat.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

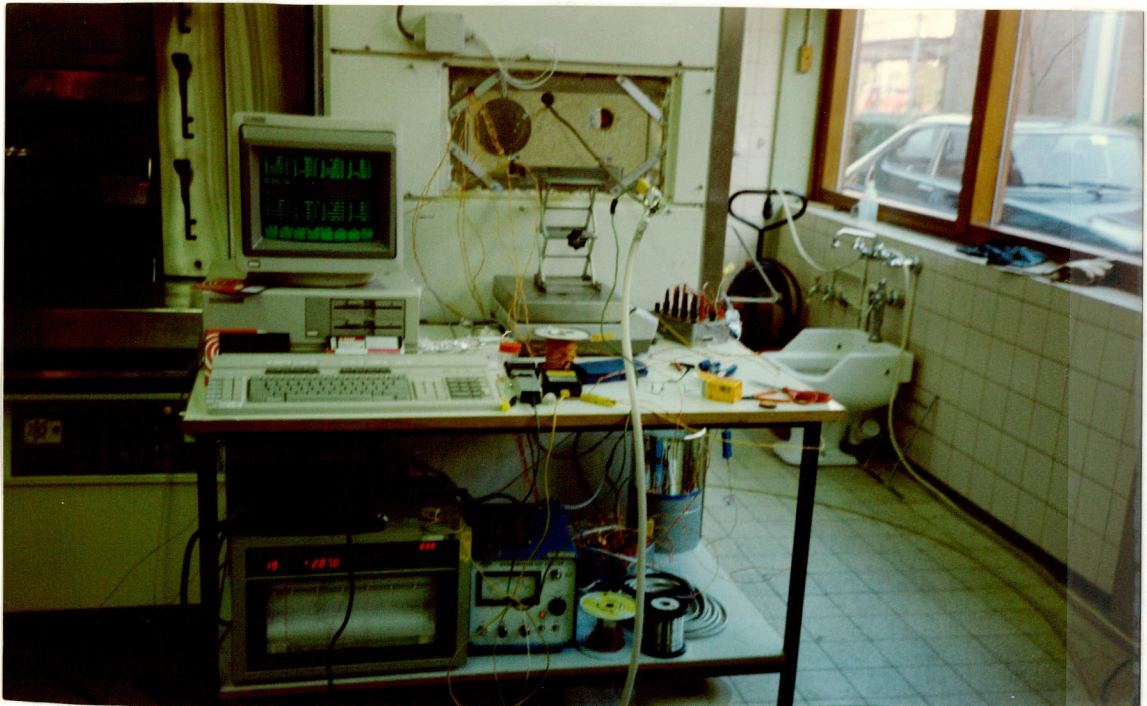


5 De Ultrakust dauwpuntsmeter. Tevens is te zien het uiteinde van het weegplateau, rustend op een balans.



6 Het metalen frame is het weegplateau, waarop de produkten geplaatst werden. De buis bovenin is de stoomtoevoerbuis.

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood



7 Overzicht van de opstelling.

Bijlage 3 Toegepaste methoden bij de warmteoverdrachtsberekeningen

B3.1 Biscuit

Inleiding

Voor de betekenis van de in deze bijlage gebruikte symbolen wordt verwezen naar de symbolenlijst.

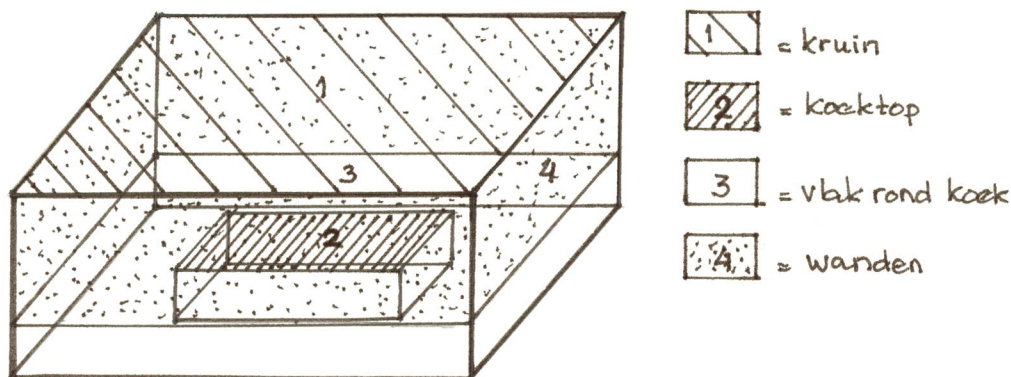
De geometrie van de opstelling van de biscuits in de bakruimte is weergegeven in figuur 2. Er liggen 20 biscuits op de bakplaat. Voor het berekenen van het topoppervlak is uitgegaan van een biscuitdiameter van 65 mm, dikte 5 mm. Het oppervlak van de zijkant is bij het topoppervlak gerekend (dit maakt 24% uit van het zo berekende totale topoppervlak, te weten 0.0868 m^2 voor 20 biscuits). Het oppervlak van de biscuits in aanraking met de bakplaat bedraagt 0.0664 m^2 voor 20 biscuits.

Ten aanzien van de warmteoverdracht naar de biscuits via de bakplaat is aangenomen, dat de bakplaat zich in quasi-stationaire toestand bevindt, zodat op elk tijdstip de aan de bakplaat overgedragen warmte naar rato van het biscuitoppervlak op de plaat aan de biscuit wordt overgedragen. De via de bakplaat door de biscuits opgenomen warmte is vervolgens bepaald uit de stralings- en convectieve warmteoverdracht naar de bakplaat. (Berekening hiervan uit de gemeten temperaturen van de bakplaat en de onderzijde van het produkt wordt te onnauwkeurig geacht wegens de onbekende geleidingsweerstand daartussen door laagjes vet en eventuele luchtinsluitingen tussen deeg en bakplaat.)

Straling

De lichte ovenrijs van de biscuits is verwaarloosd. De stralingsoverdracht van de kruin naar de biscuits en van de ovendeur en -wanden naar de biscuittop wordt gegeven door de volgende relatie (zie ook fig B3.1):

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood



Figuur B3.1

$$Q_{str_{top}} = \sigma \epsilon_p \{ (A_1 F_{1-2} \epsilon_k T_k^4 + A_4 F_{4-2} \epsilon_w T_w^4) - A_p T_p^4 \} \quad (B3.1)$$

Hierin is σ de constante van Stefan-Boltzmann, ϵ de emissiecoëfficiënt van de diverse oppervlakken, F_{1-2} de zichtfactor van kruin naar de biscuits en F_{4-2} de zichtfactor van de ovenwanden naar de biscuits. De zichtfactor F_{1-2} van kruin naar de biscuits is benaderd door het quotiënt van biscuitoppervlak en kruinoppervlak. Omdat voor de geometrie tijdens de proeven met ontbijtkoek een nauwkeurige zichthoekenberekening had uitgewezen, dat de zichthoek tussen kruin en ontbijtkoektopoppervlak 15% lager was dan de benadering via het oppervlaktenquotiënt (zie sectie B3.2), is F_{1-2} eveneens 15% lager genomen dan de via het quotiënt van de oppervlakten berekende waarde. Hieruit is via de additionele eigenschap van de factoren $A \cdot F$ de zichtfactor F_{4-2} bepaald.

De stralingsoverdracht van vloer naar de bakplaat is berekend als betrof het twee evenwijdige platen met de grootte van de bakplaat:

$$Q_{str_{bl}} = \sigma \epsilon_b A_b (\epsilon_v T_v^4 - T_b^4) \quad (B3.2)$$

De stralingstemperatuur van de kruin- en vloerelementen is bepaald als gewogen gemiddelde van de elementtemperatuur van de 1/3-sectie en van de 2/3-sectie. De stralingstemperatuur van de ovendeur en -wanden is het oppervlaktegewogen gemiddelde van de vier gemeten waarden.

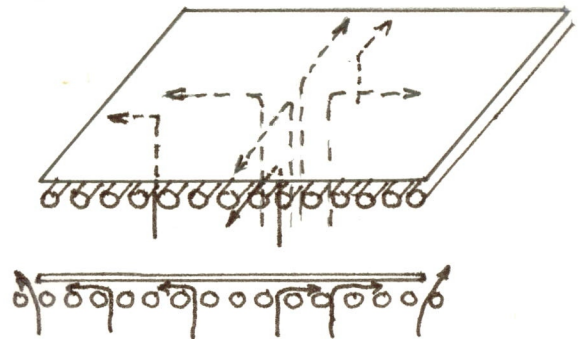
De emissiecoëfficiënt van de elementen is 0.95, die van de ovendeur en -wanden en van het produkt 0.9.

Gedwongen convectie

De warmteoverdrachtscoëfficiënt is bepaald op basis van de theorie van gedwongen convectie langs een vierkante vlakke plaat, zie ook fig B3.2 [3]:

$$Nu_L = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{0.35} \quad (B3.3)$$

geldig voor $Re_L < 400.000$



Figuur B3.2

De karakteristieke lengte L hierin is de plaatlengte; in dit geval is de gemiddelde halve plaatlengte $L=218$ mm toegepast. De kentallen worden berekend met stoffeigenschappen bij de gemiddelde filmtemperatuur. Het programma berekent deze per scan uit de oppervlaktetemperatuur, de ovenluchttemperatuur en de dauwpunttemperatuur.

De luchtsnelheid waarmee gerekend is, is bepaald uit het via het omloopkanaal gemeten totale debiet en de beschikbare ruimte voor de lucht om om de plaat te stromen. Dit resulteert in een gemiddelde luchtsnelheid van 2.8 m/s. De berekende α 's liggen tussen 17 en 18.5 W/m²K en zijn voor de proeven met een hoog dauwpunt gemiddeld 0.5 à 1 W/m²K lager dan voor de proeven met een laag dauwpunt.

De convectieve overdracht wordt vervolgens bepaald uit:

$$Q_c = A_p \cdot \alpha_c (T_p - T_o) \quad (B3.4)$$

waarin T_p de oppervlaktetemperatuur van respectievelijk de biscuit en de onderzijde van de bakplaat en T_o de zuigpyrometrische ovenluchttemperatuur.

Vrije convectie

De toegepaste relatie betreft turbulente vrije convectie boven een verwarmde plaat [3]:

$$Nu_L = 0.14 (Gr_L \cdot Pr)^{1/3}$$

geldig voor $2 \cdot 10^7 < GrPr < 3 \cdot 10^{10}$

$$\text{waarin } Gr_L = \frac{(\beta g L^3 \Delta T)}{\nu^2} \quad (B3.5)$$

De stoffeigenschappen worden bepaald bij de gemiddelde filmtemperatuur en voor iedere scan berekend uit de oppervlaktetemperatuur, de ovenluchttemperatuur en de dauwpuntstemperatuur. De resulterende warmteoverdrachtscoëfficiënten lagen tussen 4.8 en 7.5 W/m²K.

Voor de vrije convectieve overdracht naar de onderzijde van de bakplaat zijn de stoffeigenschappen berekend uit de bakplaattemperatuur, de ovenluchttemperatuur en de dauwpuntstemperatuur en is dezelfde Nu-relatie toegepast. De resulterende warmteoverdrachtscoëfficiënten lagen tussen 2.7 en 5 W/m²K.

Opgenomen warmte uit inbakverlies en opwarming

De volgende relatie is toegepast:

$$Q_{opg} = m_e \cdot C_{pe} \cdot (T_{kern} - T_{d.o}) + 2500 \cdot \Delta m \quad (B3.6)$$

De soortelijke warmte C_p van de biscuit is bepaald met behulp van de COSTHERM-relatie:

$$C_{pe} = 1.35 (1 - w_e) + 4.281 w_e \quad (B3.7)$$

Hierin is w_e het eindvochtgehalte. Voor het temperatuurverschil door opwarming is uitgegaan van de kern-eindtemperatuur.

B3.2 Ontbijtkoek

Inleiding

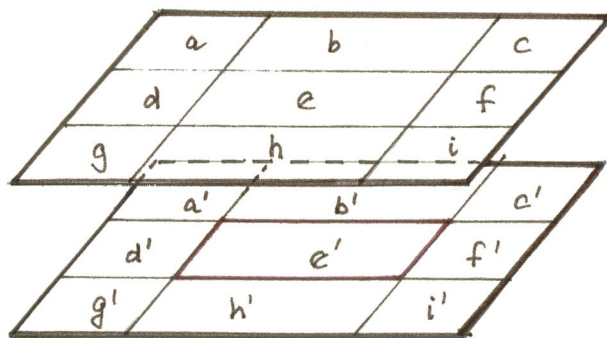
De geometrie van de opstelling van de ontbijtkoek in de oven is weer-gegeven in figuur 2. De koek wordt gebakken in een bak. Voor het berekenen van het toppervlak is uitgegaan van een vlak koekoppervlak (oppervlakte 0.155 m²). Gerekend is met een beginhoogte van de koek van 24 mm en een eindhoogte 72 mm. Uit de tijdstippen waarop de thermokoppels in het deeg geraken is de koekhoogte als functie van de baktijd bepaald.

Evenals bij biscuit is aangenomen dat de bak zich in quasi-stationaire toestand be-vindt, zodat op elk tijdstip de door de bak opgenomen warmte doorgegeven wordt aan de koek (naar rato van het koekoppervlak in aanraking met de bak).

Straling

De stralingsoverdracht naar de koektop is bepaald met behulp van re-latie (B3.1) uit de overdracht van de kruin en de omringende wanden naar de koek top. De stralingsoverdracht naar de bak is berekend met behulp van relatie (B3.2).

Voor het bepalen van de stralingsoverdracht van de kruinelementen naar de koek is een gedetailleerde zichthoekenberekening uitgevoerd voor de begin- en eind-hoogte van de koek. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende relatie [4], zie ook figuur B3.3:



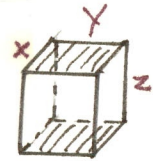
Figuur B3.3

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

$$A_1 F_{1-2} = A (abcdefghi) F (abcdefghi) - e^1$$

$$= 1/4 \{ K_{(abde)}^2 + K_{(efhi)}^2 + K_{(bcef)}^2 + K_{(degh)}^2 - K_{(ab)}^2 - K_{(ad)}^2 - K_{(bc)}^2 - K_{(cf)}^2 - K_{(fi)}^2 - K_{(hi)}^2 - K_{(gh)}^2 - K_{(dg)}^2 + K_a^2 + K_c^2 + K_g^2 + K_i^2 \} \quad (B3.8)$$

waarin $K_{j2} = A_j F_{j-j1}$



$$\text{en } F_{j-j1} = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{x} \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}} + \frac{\sqrt{y^2 + z^2}}{y} \arctan \frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}} \right.$$

$$\left. - \frac{z}{x} \arctan \left(\frac{y}{z} \right) - \frac{z}{y} \arctan \left(\frac{x}{z} \right) + \frac{z^2}{2xy} \ln \frac{(x^2 + z^2)(y^2 + z^2)}{(x^2 + y^2 + z^2)z^2} \right\}$$

Dit resulteerde in $F_{1-2}(t=0) = 0.211$ en $F_{1-2}(t=45 \text{ min}) = 0.23$. Een benadering van de zichtfactor door het quotiënt van kruin- en koekoppervlak lag circa 15% hoger (voor $t=0$). Via de additionele eigenschap van de factoren $A \cdot F$ is de zichtfactor van de omringende wanden naar de koek bepaald.

Voor het overige is de berekeningswijze als bij biscuit van toepassing, alsmede de gebruikte waarden voor de emissiecoëfficiënten.

Gedwongen convectie

De warmteoverdrachtscoëfficiënt is bepaald uit de Nusseltrelatie voor omstroming van een rechthoekig profiel [4]:

$$Nu = 0.232 Re_{Dh}^{0.731} \cdot Pr^{0.35} \quad (B3.9)$$

geldig voor $4000 < Re_{Dh} < 15.000$

Bakregime metingen aan biscuit, ontbijtkoek en brood

Gerekend is met een hydraulische diameter van de doorsnede van de bak van 115 mm en een aanstroomsnelheid van 1.3 m/s. De kentallen worden berekend met stoffeigenschappen bij de gemiddelde filmtemperatuur. Het programma berekent deze per scan uit de oppervlaktetemperatuur, de ovenluchttemperatuur en de dauwpunttemperatuur.

De berekende warmteoverdrachtscoëfficiënten lagen tussen 30 en 31 W/m²K.

Vrije convectorie

Evenals bij biscuit is relatie (B3.5) toegepast voor vrije turbulente convectorie aan een verwarmde plaat. De resulterende warmteoverdrachtscoëfficiënten lagen tussen 4 en 7 W/m²K. Voor de vrije convectorie naar de onderzijde van de plaat zijn de stoffeigenschappen bepaald uit de daar heersende gemiddelde filmtemperatuur.

Opgenomen warmte uit inbakverlies en opwarming

Relatie (B3.6) is toegepast. De soortelijke warmte C_p van de ontbijtkoek is bepaald met behulp van de COSTHERM-relatie:

$$C_{pe} = 1.27(1 - w_e) + 4.281w_e \quad (B3.10)$$

Hierin is w_e het eindvochtgehalte. Voor het temperatuurverschil door opwarming is uitgegaan van de kern-eindtemperatuur.

B3.3 Brood

Inleiding

De geometrie van de opstelling van de koppels broden in de oven is weergegeven in figuur 2. Het oppervlak van het deeg/brood in aanraking met het bakblik was 0.1002 m². Voor het topoppervlak van het deeg aan het begin van de bakproef is gerekend met 0.0409 m², en voor de broodtop aan het eind van de bakproef met 0.0824 m². De tussenliggende oppervlakten zijn berekend uit de hoogte van het brood als functie van de baktijd.

Evenals bij biscuit en ontbijtkoek is aangenomen dat het bakblik zich in quasi-stationaire toestand bevindt, zodat op elk tijdstip de door het blik opgenomen warmte doorgegeven wordt aan het deeg.

Straling

De stralingsoverdracht is berekend uit de aandelen overdracht van kruin naar broodtop, van de omringende wanden naar de kleine zijanten van het bakblik en van de vloer naar de bodem van het bakblik.

De zichthoek voor de overdracht van kruin naar broodtop is berekend uitgaande van een rechthoekig oppervlak met rijzende hoogte met gelijke waarde als het werkelijke broodoppervlak op dat tijdstip van de bakproef. Hierbij een een soortgelijke methode gevolgd als weergegeven in relatie (B3.8).

De zichthoeken tussen vloer en bodem en tussen de wanden en de zijanten van het blik zijn bepaald als betrof het evenwijdige oppervlakken. Met invulling van de berekende zichthoeken zijn vervolgens de relaties (B3.1) en (B3.2) gebruikt voor het berekenen van de stralingsoverdracht.

Voor het overige is de berekeningswijze als bij biscuit van toepassing, alsmede de gebruikte waarden voor de emissiecoëfficiënten.

Gedwongen convectorie

Voor het berekenen van de warmteoverdrachtscoëfficiënt is de rij broodblikken in de bakruimte opgevat als een rij omstroomde buizen met zeshoekige doorsnede. Volgens [8] kan voor een enkele rij buizen de Nusseltrelatie voor één buis gebruikt worden, mits een andere snelheid wordt toegepast dan de aanstroomsnelheid (namelijk de over de lengte van de insnoering gemiddelde snelheid tussen de buizen) en de stoffeigenschaften bepaald worden bij de gemiddelde gastemperatuur voor en na de rij buizen. In dit geval is derhalve de Nusseltrelatie toegepast voor omstroming van een zeshoekige doorsnede [4]:

$$Nu = 0.162 Re_{Dh}^{0.638} Pr^{0.35} \quad (B3.11)$$

geldig voor $5000 < Re_{Dh} < 19.500$

waarin de hydraulische diameter varieerde van 101 mm aan het begin van de bakproef tot 125 mm aan het einde. In plaats van de aanstroomsnelheid is de gemiddelde snelheid over de hoogte van de vrije ruimte tussen de bakblikken toegepast; deze bedroeg 2.96 m/s. De stoffeigenschaften zijn bepaald bij de ovenluchttemperatuur per scan uit de gemeten ovenluchttemperatuur en de dauwpunttemperatuur.

De berekende warmteoverdrachtscoëfficiënten lagen tussen 25 en 23 W/m²K.

Opgenomen warmte uit opwarming en inbakverlies

Relatie (B3.6) is toegepast. De soortelijke warmte C_{pe} van het brood is bepaald met behulp van de COSTHERM-relatie:

$$C_{pe} = 1.31(1-w_e) + 4.281 w_e \quad (B3.12)$$

Hierin is w_e het eindvochtgehalte. Voor het temperatuurverschil door opwarming is uitgegaan van de kerneindtemperatuur.

B3.4 Discussie

Alle bovenbeschreven berekeningsmethoden voor convectieve overdracht zijn gebaseerd op gemiddelde warmteoverdrachtscoëfficiënten over een oppervlak. Omdat gedetailleerde gegevens over het stromingspatroon rondom de produkten niet beschikbaar gekomen zijn, is nauwkeuriger berekening van de convectieve overdracht op basis van lokale warmteoverdrachtscoëfficiënten niet mogelijk. De toegepaste relaties zijn gebaseerd op goed gedefinieerde omstandigheden van convectie langs grote platen of keurige omstroming van lichamen, die de condities tijdens de proeven slechts benaderen. De nauwkeurigheid van de berekende convectieve warmtestromen is hierdoor nauwelijks aan te geven.

Wat betreft de stralingsoverdracht dient in aanmerking genomen te worden, dat de elementen als een plat vlak met een gemiddelde stralingstemperatuur zijn opgevat. In werkelijkheid heeft de tussenruimte tussen de elementen een ander stralingsgedrag. Verwacht mag worden, dat de berekende warmtestromen door straling iets overschat zijn.