



Notat

Højere frostlagringstemperatur

Metodeudvikling og saltets betydning for indfrysning

23. marts 2026

Proj.nr. 2013376

Version 01

Init. GMJR/MT/MAHD

Sammendrag

Dette notat undersøger saltindholdets betydning for frysepunktet og hårdheden i kødprodukter som en del af projektet "Højere frostlagringstemperatur". Formålet var at klarlægge sammenhængen mellem saltkoncentration, temperatur og tekstur.

Homogeniseret grisefilet blev tilsat varierende mængde salt, indfrosset ved forskellige temperaturer og efterfølgende optøet under kontrollerede forhold. Produkternes hårdhed (peak force i Newton) blev målt ved forskellige kernetemperaturer under optøningen. Resultaterne viser en klar sammenhæng mellem øget saltindhold og en lavere hårdhed ved en given temperatur. Dette understøtter, at salt sænker frysepunktet og efterlader en større andel ikke-frosset vand i produktet. Prøver med 3-4% salt opnåede kun en hårdhed på omkring 400-600 N ved temperaturer omkring -15°C, hvilket var den hårdhed, der blev defineret som værende optimal til slicening. En statistisk model blev udviklet til at beskrive sammenhængen mellem hårdhed, temperatur og saltindhold. Modellen viste sig at være robust og kan anvendes til bl.a. at estimere de temperaturintervaller, hvor produkter med et givent saltindhold er slicebare.

Konklusion

Forsøget viser, at saltindholdet har en markant indflydelse på produkternes fryseadfærd og hårdhed ved givne temperaturer. Med stigende saltkoncentrationer bliver prøverne blødere ved samme kernetemperatur, hvilket indikerer, at en større andel af vandet forbliver ikke-frosset.

For prøver med højt saltindhold (3-4%) opnås en hårdhed egnet til slicening (ca. 400-500 N) ved temperaturer omkring -15°C. Samtidig opnår disse prøver ikke en fuldt frossen tilstand (hårdhed >900N) inden for de testede temperaturrammer. Dette understreger, at saltede produkter kræver lavere lagringstemperaturer end usaltede for at opnå tilsvarende grad af fasthed/frossenthed.

Den udviklede statistiske model beskriver tilfredsstillende sammenhæng mellem temperatur, saltindhold og log-transformeret hårdhed. Modellen kan anvendes som et værktøj til at estimere temperaturintervaller, hvor produkter med et givent saltindhold er slicebare. Modellen er derimod ikke egnet til at bestemme den præcise temperatur, hvor saltede produkter opnår en hårdhed på over 900 N. Fastlæggelse af dette ville kræve, at forsøget blev udvidet med lavere temperaturer end -18°C.

Indledning

Forædlede produkter skal indgå som en del af projektet "Højere frostlagringstemperatur". I den forbindelse det vigtigt at kende saltets betydning for produkternes frysepunkt. Mobilitet af frit vand spiller en væsentlig rolle for oxidationshastigheden, og det er veldokumenteret, at salt øger denne mængde markant ved en given frosttemperatur (Hansen, 2004). Mens de kemiske og fysiske ændringer er centrale for produktkvaliteten ved frostlagring, er den mikrobielle sikkerhed ikke udfordret ved frostlagring på -12°C eller lavere (James et al., 2025).

I en bacheloropgave i samarbejde med DTU blev saltindholdets betydning for frysepunkt af kødprodukter undersøgt (Nielsen, 2026). En analysemetode, der kan indikere frysegraden af saltede produkter, blev desuden udviklet.

Metode

Forsøget blev udført i to uafhængige replikater, hvor der blev arbejdet med en homogen masse. Mager grisefilet blev homogeniseret i Vorwerk Thermomix® (Vorwerk, Tyskland) og tilsat vakuumsalt (NaCl, Kryta A/S, Danmark, varenr. 2006) for at opnå saltkoncentrationer på hhv. 0, 1,5 og 3% salt. De faktiske saltkoncentrationer i hver batch blev efterfølgende bestemt ved titrering og anvendt i den videre dataanalyse (se tabel 2).

Massen blev derefter pakket i runde silikoneforme (Pavoni bageform, varenr. 8FR024, H.W. Larsen, vol. 22 mL, D_{Top} : 40 mm, D_{Bund} : 20 mm, H: 20 mm). En termologger (Testo 176T4, T-type termoelement, Testo, Tyskland) blev monteret i centrum af en prøve til dokumentation af indfrysningsskurve samt overvågning af optøningsprocessen. Prøverne blev indfrosset hhv.

- i pilot plants fryserum 1079 ved -18°C
- i fryseskab indstillet til -15°C
- i en alukasse indstillet til -9°C .

Fra hver batch homogeniseret prøvemateriale med tilsat salt (1,5% og 3%) blev der udtaget prøve til bestemmelse af saltindhold samt komponentanalyse ved FoodScan.

Prøverne blev indfrosset natten over. En halv time før transport til et køleskab ved 4°C , hvor prøverne skulle optø, blev de taget ud af silikoneformene. Transporten foregik i flamingokasse med is for at minimere optøning under transport.

Prøvernes hårdhed blev målt ved tid 0 og derefter med de tidsintervaller, der er angivet i tabel 1. Tidsintervallerne for målingerne blev tilpasset de forskellige saltkoncentrationer, da et højere saltindhold forventedes at sænke frysepunktet og give et blødere produkt. Målingerne for prøver med 3% salt blev derfor udført med kortere intervaller for at kunne fange ændringerne i hårdhed under optøning. Hårdheden blev bestemt med en TA.XT Texture Analyzer plus 100 (Stable Micro Systems, Storbritannien) med følgende indstillinger:

- Testhastighed: 1,00 mm/s
- Trigger mode: Distance
- Afstand: 10 mm
- Triggerkraft: 0,050 N
- Loadcell: 100 kg

Table 1. Oversigtstabel over analysetidspunkter af prøvernes hårdhed afhængig af matricens saltkoncentration.

	0/1,5% salt (min)	3% salt (min)
T0	0	0
T1	30	10
T2	60	20
T3	75	30
T4	90	40
T5	105	50
T6	110	60
T7	120	70

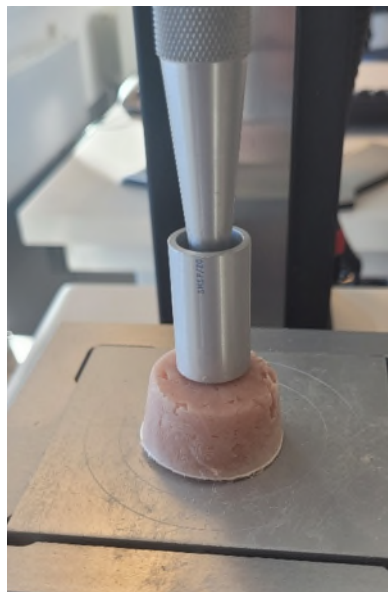
Alle teksturanalysen blev udført i triplikater.

Figur 1 viser opsætning af prøven ved hårdhedsanalysen, herunder det hoved, der blev anvendt til analysen.

Komponentanalyse og saltbestemmelse blev kun udført på prøver med tilsat salt (1,5% og 3%). Indholdet af fedt, protein og vand blev bestemt ved NIR-komponentanalyse på FoodScan™ 2 Meat Analyser (FOSS, Danmark).

Til bestemmelse af saltindholdet blev der udført potentiometrisk titrering af klorid med sølvnitrat på en Titrator T5 (Mettler Toledo, Ohio). Saltanalysen blev udført i duplikater.

Statistisk modellering af dataene blev udført i RScript (4.4.2).



Figur 1. Opsætning af prøve i TA.XT Texture Analyzer.

Resultater

Resultaterne fra komponentanalysen ved FoodScan samt saltbestemmelsen præsenteres i tabel 2 for hvert uafhængigt replikat. De målte saltkoncentrationer afveg i nogle tilfælde fra de tilsigtede værdier. Prøverne, der var planlagt til at indeholde 1,5% salt, havde et gennemsnit på 1,75%. For prøverne planlagt til at indeholde 3% salt, havde det ene replikat en markant højere saltkoncentration på 3,98%. Disse målte saltkoncentrationer blev anvendt i den efterfølgende dataanalyse. Komponentanalysen blev ikke udført på prøvemateriale uden tilsat salt.

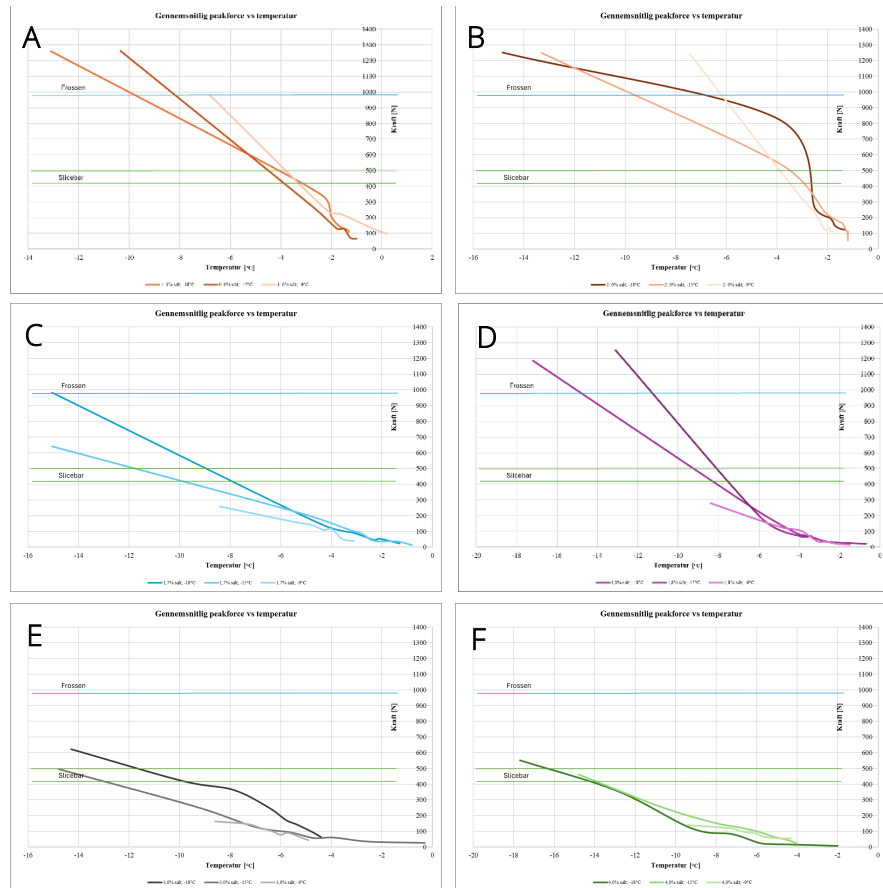
Tabel 2. Resultater fra komponentanalyse af hvert replikat for prøve med 1,5% og 3% salt. Saltindhold stammer fra titrering (n=2), mens de øvrige værdier stammer fra FoodScan (n=7).

	1,5% salt		3% salt	
	Replikat 1	Replikat 2	Replikat 1	Replikat 2
Salt (%)	1,83 ± 0,10	1,67 ± 0,01	3,04 ± 0,01	3,98 ± 0,11
Fedt (%)	0,72 ± 0,049	0,76 ± 0,048	0,63 ± 0,079	0,13 ± 0,033
Protein (%)	23,88 ± 0,126	23,43 ± 0,103	22,69 ± 0,194	22,37 ± 0,098
Vand (%)	73,2 ± 0,082	73,42 ± 0,134	72,42 ± 0,077	72,44 ± 0,077

Resultaterne fra teksturanalyserne vises i figur 2, hvor der for hver saltkoncentration er plottet maks. kraftpåvirkning (peak force) som funktion af prøvernes kernetemperatur. Praktikaliteterne tillod, at de tidligste hårdhedsmålinger blev foretaget ved kernetemperatur på -17°C; dette lykkedes dog ikke for alle prøver.

Prøver med en peak force over 900 N betragtes som værende frosne, mens den bedste slicebarhed opnås ved en hårdhed mellem 400 og 500 N. Slicebarhed er en kritisk parameter i industriel produktion af fx pålægsprodukter, hvor en ensartet og præcis skæring afhænger af produktets hårdhed. En optimal hårdhed sikrer, at produktet hverken er for blødt eller for hårdt. Praktisk erfaring viser, at sliceability for usaltede kødprodukter er optimal ved en kernetemperatur omkring -3°C, hvilket svarer til intervallet 400-500 N i de data, der er vist i figur 2.

Øget saltindhold påvirkede prøvernes hårdhed, idet de bliver blødere og dermed "mindre frosne" ved samme temperatur (figur 2). Det betyder, at for prøver med 3 og 4% salt opnås en hårdhed omkring 400-600 N ved temperaturer på ca. -15°C. Det skal nævnes, at disse prøver ikke bliver stivfrosne (hårdhed >900N) ved -18°C. Dette resultat stemmer overens med tidligere forskning, som viser, at salt nedsætter andelen af krystalliseret vand i kødet, hvilket resulterer i et blødere produkt ved en given frosttemperatur (Hansen, 2004).



Figur 2. Fire plots, der viser produkternes kraftpåvirkning (peak force) vs. kerne-temperatur afhængig af saltkoncentrationen. Plot A og B er begge udført på prøver uden tilsætning af salt. De resterende plots er udført på prøver med tilsat salt: Plot C tilsat 1,7% salt; Plot D tilsat 1,8% salt; Plot E tilsat 3% salt; Plot F tilsat 4% salt.

For at kunne forudsige, hvordan salt og temperatur påvirker kødprodukters hårdhed, blev der udviklet en statistisk model. Formålet med modellen er at beskrive sammenhængen mellem kerne-temperatur, saltindhold og den resulterende hårdhed. En sådan model kan i praksis anvendes til vurdering af produkters frossenhed ved de brugte lagringstemperaturer for produkter med forskelligt saltindhold. Derudover giver modellen særligt et indblik i temperaturer med ideel hårdhed for industriel slicering.

De målte data blev benyttet til opbygning af en statistisk model. En simpel lineær regression på den utransformerede hårdhed var ikke egnet, da antagelserne for modellen ikke var opfyldt, hvilket kom til udtryk ved en systematisk gruppering og stor spredning i residualerne. Der blev derfor afprøvet både logaritmisk og kvadratisk transformation af hårdhedsdataene. Den logaritmiske transformation gav en markant forbedring, men inspektion af residualplots viste fortsat utilfredsstillende fordeling af residualerne, hvorfor modellen endnu ikke var optimal.

For at beskrive temperaturens ikke-lineære effekt blev der derefter tilføjet et kvadratisk polynomium af temperaturen samt interaktionen med saltindhold.

Denne model gav en markant bedre pasform end den lineære model, både vurderet ved likelihood-ratio-test (ANOVA) og ved AIC ($\Delta AIC \sim 62$; $\Delta AIC > 10$ anses som stærk evidens for modellen med lavest AIC), selvom den bruger flere frihedsgrader.

Da der forligger flere målinger over temperaturen for hver prøvebatch, og da forholdet mellem temperatur og log(hårdhed) ikke nødvendigvis er identisk for alle prøver, blev det undersøgt, om tilføjelse af random slopes for temperatur kunne forbedre modellen yderligere. Sammenligning af modellerne med og uden random slope viste, at likelihood'en blev markant forbedret (meget signifikant likelihood-ratio-test), og at ΔAIC var ca. 22, hvilket klart understøtter, at hældningen af temperaturen varierer mellem prøvebatchene.

Den bedste model blev derfor:

$$\log(H_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 T_{1,ij} + \beta_2 T_{ij}^2 + \beta_3 S_i + \beta_4 (T_{ij} S_i) + \beta_5 (T_{ij}^2 S_i) + b_{0i} + b_{1i} T_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

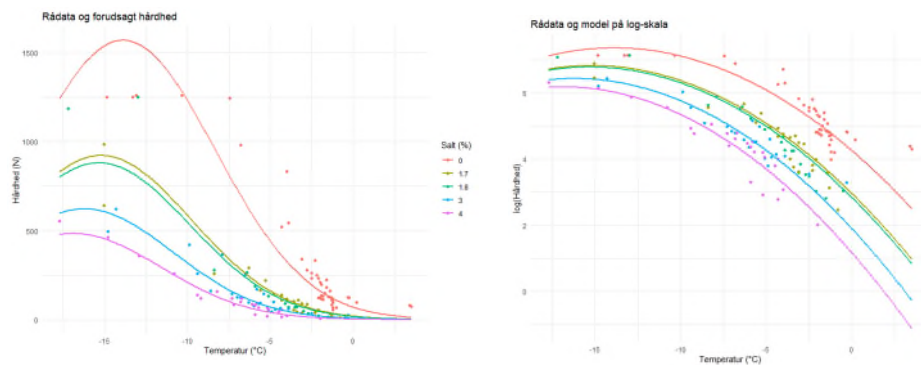
hvor:

- H_{ij} : hårdhed for prøve i ved observation j
- T_{ij} : temperatur
- S_i : saltindhold
- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_5$: regressionskoefficienter for modellens faste effekter
- b_{0i} : random intercept for prøve i
- b_{1i} : random hældning af temperaturen for prøve i
- $(b_{0i}, b_{1i})^T \sim N(\mathbf{0}, \Sigma_b)$ er random intercept og random hældning
- ε_{ij} : residual

I modellen ser vi således:

- kvadratisk effekt af temperaturen
- hovedeffekt af salt
- interaktion mellem både lineær og kvadratisk temperatur og salt
- random intercept og random hældning for temperatur for hver prøve

Den kvadratiske effekt af temperaturen skyldes, at sammenhæng mellem temperatur og hårdhed ikke er lineær. Når vandet i kødet begynder at fryse, sker der en hurtig og markant stigning i hårdheden, da en stor mængde frit vand omdannes til is. Ved lavere temperaturer er det meste af det frie vand allerede frosset. Yderligere temperaturfald vil kun fryse en lille mængde mere bundet vand, og stigningen i hårdhed bliver derfor mindre og mindre markant for hver grad.



Figur 3. Rådata plottet sammen med den endelige model. Venstre panel: hårdhed på utransformeret skala. Højre panel: samme data og modelkurve på log-skala (log(hårdhed)).

Sammenhæng mellem rådata og model præsenteres i figur 3. Især ved den logaritmiske y-akse (figuren til højre) ses det, at modellen beskriver tendensen i data tilfredsstillende, selvom rådata for 0% salt ikke passer helt til modelkurven i figuren til venstre.

Modellen kan anvendes til at estimere de temperaturer, hvor prøverne er slicebare. Da data ikke dækker det område, hvor de saltede prøver kan betragtes som fuldstændig frosne (peak force < 900 N), kan det ikke anbefales at bruge modellen til bestemmelse af den temperatur, hvorved saltede produkter er helt indfrosne.

Konklusion

Forsøget viser, at saltindholdet har en markant indflydelse på produkternes fryseadfærd og hårdhed ved givne temperaturer. Med stigende saltkoncentrationer bliver prøverne blødere ved samme kernetemperatur, hvilket indikerer, at en større andel af vandet forbliver ikke-frosset.

For prøver med højt saltindhold (3-4%) opnås en hårdhed egnet til slicing (ca. 400-500 N) ved temperaturer omkring -15°C . Samtidig opnår disse prøver ikke en fuldt frosen tilstand (hårdhed >900N) inden for de testede temperaturrammer. Dette understreger, at saltede produkter kræver lavere lagringstemperaturer end usaltede for at opnå tilsvarende grad af fasthed/frossenthed.

Den udviklede statistiske model beskriver tilfredsstillende sammenhæng mellem temperatur, saltindhold og log-transformeret hårdhed. Modellen kan anvendes som et værktøj til at estimere temperaturintervaller, hvor produkter med et givent saltindhold er slicebare. Modellen er derimod ikke egnet til at bestemme den præcise temperatur, hvor saltede produkter opnår en hårdhed på over 900 N. Fastlæggelse af dette ville kræve, at forsøget blev udvidet med lavere temperaturer end -18°C .

Referencer

- Hansen, E. (2004). *Chemical and Physical Changes in Pork during Freezing and Frozen Storage* [Ph.D. Thesis]. The Royal Veterinary and Agricultural University.
- James, C., James, S. J., Purnell, G., Talbot, L., Hebishy, E., Bowers, S., Onarinde, B. A., Huynh, L., & Jenson, I. (2025). The practical storage life of Australian frozen boxed beef and lamb [Bachelor Thesis]. In *International Journal of Refrigeration* (Vol. 171). <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.12.018>
- Nielsen, A. S. D. (2026). *Saltindholdets betydning for frysepunktet i kød og forædlede kødprodukter*.