

Laila Matikainen

## **Kypsymisen kuvausmenetelmä**

Perunan kypsyamisprosessi

Opinnäytetyö

Syksy 2012

Tekniikan yksikkö

Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Bio- ja elintarviketekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Elintarviketekniikka

Tekijä: Laila Matikainen

Työn nimi: Kypsymisen kuvausmenetelmä

Ohjaaja: Pasi Junell

Vuosi: 2012 Sivumäärä: 109 Liitteiden lukumäärä: 5

---

Kypsymisen kuvausmenetelmän kehittämistyössä on korostettu perunan kypsymisen olennaisia tekijöitä pelkistämällä kypsymistapahtumaa. Tämän idean pohjalta on koottu menetelmäkokonaisuus, joka yhdessä tutkimusmenetelmien kanssa muodostaa kypsymisen kuvausmenetelmän.

Menetelmän yhdeksi vakioksi löydettiin epästationäärisen lämmönsiirron teoriasta pallon symmetriaan perustuva seuranta. Tätä soveltaen kaikki mittaukset noudattivat samaa sädelinjaa pallon reunasta keskipisteeseen. Menetelmää testattiin kolmelle eri keittotavalle: Vesikeitolle, höyrykeitolle ja höyrykypsennykselle paperinytissä, joista pyrittiin havainnoimaan kypsymistapahtumaa sekä keittomenetelmien eroja. Menetelmä soveltuu suoraan kaikille sellaisille kypsennysmenetelmille, joissa kypsytminen etenee pinnasta alkaen.

Työssä on analysoitu yhden raaka-aineen, perunan muutoksia kypsennyksen aikana. Muutoksia on seurattu mittaamalla aluksi lämmön siirtymistä, mistä saadun tiedon pohjalta on siirrytty rakenteen ja solutason muutosten seuraamiseen. Seuratuista kolmesta keittotavasta saatujen tulosten todettiin olevan loogisia, eli nytytissä höyrykeitetty peruna kypsyi höyry- ja vesikeitetystä selvästi jäljessä. Toisaalta, vedessä keitetty peruna vaikutti kypsyvän tehokkaimmin.

Menetelmällä tutkittiin myös itse kypsytystapahtuman käännekohtaa, jota haettiin lämpökameralla saatujen mittaustulosten perusteella. Käännekohtalle pyrittiin hakemaan vahvistusta termopari- ja rakennemittausten sekä mikroskooppikuvien pohjalta. Tällä materiaalilla mahdollisia käännekohtia oli havaittavissa kahdella erillisellä aikajaksolla. Tästä ei kuitenkaan saatu johdonmukaista varmuutta. Rakennemittaukset ja mikroskooppianalyysit tukevat kuitenkin edellä mainituista myöhäisempää aikapistettä.

Avainsanat: peruna, kypsytminen, menetelmä, kypsytysprosessi, tarkkelys, gelatinoituminen, lämmön siirtyminen, lämmön johtuminen, mikroskopia, rakenneanalyysi

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Biotechnology and Food Processing

Specialisation: Food Technology

Author: Laila Matikainen

Title of thesis: A method for describing the cooking process

Supervisor: Pasi Junell

Year: 2012      Number of pages: 109      Number of appendices: 5

---

The main subject of the work was to emphasize the essential changing factors of the potato cooking process by reducing external effects. The method ensemble for describing the cooking process consists of these techniques and research methods.

Applying the idea of ball symmetry from transient heat conduction theory became one of the key constants for the whole method. All measurements and analyses complied with the same radius from the ball surface to the centre point. The method was tested by observing the differences of three different cooking methods: cooking in water, steam boiling and steam boiling in paper pouch. The method is directly applicable to all cooking methods where cooking proceeds from the surface towards the centre.

The changes during the cooking process were analysed for one raw material: potato. At first, they were observed by measuring temperatures during the heat transfer process. The observation points for structure and microscopy analysis were chosen according to the information gained from the temperature analysis. The final results were found logical, i.e. cooking in a paper pouch was slower than the other cooking methods. On the other hand, cooking in water seemed to be the most effective one.

Some assumptions were also made about the turning point of the cooking process, which was searched based on the thermography results. Attempts to confirm the turning point were made with a thermocouple, structure analysis and microscopy. According to this research material there were possible turning points at two different time intervals, but a consistent certainty was never achieved. The structure and microscopy analyses were, however, supporting the latter of the two time intervals.

Keywords: potato, cooking, cooking process, method, starch, gelatinization, heat transfer, heat conduction, microscopy, structure analysis

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuvio- ja taulukkuuettelo.....	7
Laskentakaavat .....	10
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	11
<b>1 MENETELMÄN MÄÄRITTELY.....</b>	<b>13</b>
1.1 Aiheen kuvaus.....	13
1.2 Tutkimuskohde.....	13
1.3 Sovelluskohteet.....	14
<b>2 KYPSYMISPROSESSIN OSATEKIJÄT .....</b>	<b>15</b>
2.1 Peruna tutkimuskohteena .....	15
2.2 Kypsymisen muutokset solutasolla .....	17
2.2.1 Kypsymistapahtuma.....	17
2.2.2 Tärkkelyksen gelatinoituminen.....	19
Jodi perunan kypsymisen muutoksissa.....	20
2.2.3 Veden laadun ja pH:n vaikutukset perunan kypsymiseen.....	21
<b>3 TUTKIMUSMENETELMÄT .....</b>	<b>23</b>
3.1 Työn suunnittelu ja menetelmien muotoutuminen .....	23
3.1.1 Perunan muodon ja tutkittavien kypsennystapojen valinta.....	23
3.1.2 Rakenteen ja solutason muutosten seurannan menetelmäkehitys ..	24
3.2 Mikroskopointi .....	25
3.3 Rakenteen muutosten mittaaminen.....	27
3.4 Lämmön etenemisen osatekijät.....	29
3.4.1 Lämmön siirtymisen seuranta .....	29
3.4.2 Lämmönsiirtotapahtuma.....	31
Epästationäärinen lämmönsiirto.....	32

3.4.3	Kypsennystavat.....	35
	Vaikuttavat virtaukset ja turbulenssi.....	37
3.4.4	Perunan lämpöopilliset ominaisuudet .....	38
	Ominaislämpökapasiteetti .....	39
	Lämmönjohtavuus.....	40
	Diffuusiokerroin /lämpötilan tasoittumiskerroin.....	42
	Faasinmuutokset perunassa .....	43
4	<b>KYPSYMISEN KUNNAN TUTKIMUKSET .....</b>	<b>44</b>
4.1	Lämmön siirtymisen tutkimukset .....	44
4.1.1	Menettelytavat.....	44
	Perunoiden esikäsittely .....	44
	Keittomenettelyjen pelkistäminen.....	45
	Lämpökuvausmenettely .....	46
	Punnitukset, muistiinpanot ja videotalliot .....	47
	Muut lämmönsiirtymisen mittaukset .....	48
4.1.2	Lämmönsiirron analyysit .....	49
	Lämpökuvien analysoiminen.....	49
	Otannan suorittamisen vaihtoehtoja.....	50
	Aineiston jatkokäsittely.....	51
4.2	Rakenteen ja solutason analyysit.....	52
4.2.1	Mikroskooppikuvaukset.....	52
	Mikroskooppikuvauksien toteutus .....	52
4.2.2	Rakennemittaukset .....	55
	Perunan rakennemittauksien toteutus.....	55
5	<b>TULOKSIA KOLMELLE KYPSENNYSTAVALLE .....</b>	<b>56</b>
5.1	Lämmönsiirtymistutkimusten tulokset.....	56
5.1.1	Yleiskatsaus: Lämmön etenemisen seuranta eri keittomenetelmillä.....	56
	Vesikeitot .....	57
	Höyrykeitot .....	59
	Nyyttikeitot .....	60
	2-, 10- ja 20 minuutin keitot, vertailu .....	61
5.1.2	Lämpötilojen muutosten nopeus .....	64
	Lämpötilojen muutokset perunan sisällä .....	65

Muutosnopeudet aikapisteittäin.....	66
Muutosnopeudet termoparimittauksien perusteella.....	71
Muutosnopeuksien yhteenveto .....	75
5.1.3 Kypsän ja raa'an perunan materiaaliominaisuudet .....	76
5.1.4 Lämpökameramittausten jäähtymisongelma ja virhearvioinnit .....	78
Lämpökameran arvojen vertailu termoparin avulla .....	80
Kahden peräkkäisen lämpökuvan vertailu.....	83
Muut virhearvioinnit.....	85
5.1.5 Lämmönsiirto-osion johtopäätökset .....	85
5.2 Mikroskooppikuvausten tulokset .....	87
5.2.1 Mikroskooppikuvien tulkinta .....	87
5.2.2 Tuloksia kolmelle eri kypsennystavalle .....	90
5.2.3 Mikroskopoinnin arviointi.....	94
5.3 Rakennemittausten tulokset.....	97
5.3.1 Rakennemittausten tulosten analysointi.....	97
5.3.2 Rakenneanalyysin arviointi .....	101
5.4 Tulkinnan esimerkki 12 minuuttia keitetylle perunalle .....	102
5.4.1 Rakennemittaus ja lämpötilatieto .....	102
5.4.2 Mikroskooppikuvien ja lämpödatan yhdistäminen .....	103
pH:n vaikutus tuloksiin .....	104
<b>6 MENETELMÄN SOVELTAMINEN JA PROSESSIN KULKU .....</b>	<b>105</b>
<b>7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>107</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>110</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>113</b>
Liite 1: 10 minuutin keittojen rakenteiden vertailu .....	113
Liite 2: 12 minuutin keittojen rakenteiden vertailu .....	114
Liite 3: 14 minuutin keittojen rakenteiden vertailu .....	115
Liite 4: 16 minuutin keittojen rakenteiden vertailu .....	116
Liite 5: Rakenteen muutosnopeudet .....	117

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Eri kypsyvaiheissa olevaa perunan solukkoa.....	18
Kuvio 2. Jodiliuksella sivelty, pari minuuttia keitetty ja halkaistu peruna.....	19
Kuvio 3. Kypsän jauhomaisen perunan irtonaisia partikkelimaisia soluja (jodivärjätty).(sm) .....	20
Kuvio 4. Työn tekemisen ajankohtana (2012) mitatut veden, höyryn ja perunan pH-arvot.....	22
Kuvio 5. Lämpökuvat vedessä (vas) ja mikrossa kuumennetusta (oik) perunasta.	23
Kuvio 6. Pallon säteen mittauspisteet .....	24
Kuvio 7. Perunan solukko on läpikuultavaa. ....	26
Kuvio 8: Höyrynyytti: Painon muutokset kypsennyksen ja haihtumisen vaikutuksesta. ....	37
Kuvio 9: Höyrynyytti (Saga Ruoanlaittopaperi) .....	45
Kuvio 10: Perunan halkaisu lämpökuvauksen tiimellyksessä. ....	46
Kuvio 11: Lämpökuva 14 minuuttia höyryssä keitetystä perunasta.....	49
Kuvio 12. Lämpökuvan lämpötilatietojen perusteella tehty kaaviokuva 2 minuuttia keitetystä halkaistusta perunasta.....	51
Kuvio 13: Perunan mikroskooppileikkeitä värjäytymässä jodihöyrykammiossa ....	53
Kuvio 14. Rakennemittaus 2 mm:n sylinterillä. Kuvassa seurataan sylinterin osumista perunan puoliskon keskikohtaan. ....	55
Kuvio 15: Vedessä keitetyn perunan lämpötilat mitattuna 2 minuutin ja 2 mm:n välein perunan ulkoreunasta keskipisteeseen. ....	57
Kuvio 16. Vesikeitto: Keskikohdan lämpötilat lämpökameralla ja termoparilla .....	58
Kuvio 17: Höyryssä keitetyn perunan lämpötilat mitattuna 2 minuutin ja 2 mm:n välein perunan ulkoreunasta keskipisteeseen .....	59
Kuvio 18. Höyrykeitto: Keskikohdan lämpötilat lämpökameralla ja termoparilla.....	59
Kuvio 19. Höyrynyyttissä keitetyn perunan lämpötilat mitattuna 2 minuutin ja 2 mm:n välein perunan ulkoreunasta keskipisteeseen.....	60
Kuva 20. Nyttikeitto: Keskikohdan lämpötilat lämpökameralla ja termoparilla .....	60
Kuvio 21. 2 minuutin keiton vertailu eri keittotapojen kesken.....	61
Kuvio 22. Kolmen keittotavan vertailu 10 minuutin keiton jälkeen.....	62
Kuvio 23. Keittotapojen vertailu 20 minuutin keiton jälkeen .....	62

Kuvio 24. Lämpötilatietojen perusteella tehty profiili 20 minuuttia keitetystä halkaistusta perunasta.....	63
Kuvio 25: Lämpökuvissa halkeamat näkyvät vaaleina viiruina.....	63
Kuvio 26: Keittojen muutosasteet keittoajoittain eri mittauspisteissä .....	65
Kuvio 27: Vesikeiton lämpötilamuutosten vaihtelut.....	66
Kuvio 28: Vesikeiton muutosnopeuksien keskiarvot ja virheet.....	67
Kuvio 29: Höyrykeiton lämpötilamuutosten vaihtelut.....	68
Kuvio 30: Höyrykeiton muutosnopeuksien keskiarvot ja virheet .....	69
Kuvio 31: Nyyttikeiton lämpötilamuutosten vaihtelut.....	69
Kuvio 32: Nyyttikeiton muutosnopeuksien keskiarvot ja virheet.....	70
Kuvio 33: Vesikeiton muutosnopeuden seuranta termoparimittauksista .....	72
Kuvio 34: Vesikeiton muutosten keskinäinen vertailu. (termopari) .....	72
Kuvio 35: Höyrykeiton muutosnopeuksissa erottuvat aikapisteet 11, 12. ja 15: 30.73	
Kuvio 36: Höyrykeiton muutosten keskinäinen vertailu (termopari).....	73
Kuvio 37: Nyyttikeiton muutosnopeuksissa näkyy kevyitä hidastumisia 12:30, 14 ja 15 minuutin kohdalla. Mitään merkittävää havaintoa ei voida tästä tehdä. ....	74
Kuvio 38: Nyyttikeiton muutosten keskinäinen vertailu (termopari) .....	74
Kuvio 39: Aikapisteen muutos verrattuna edelliseen. (Lämpökamera) .....	75
Kuvio 40: Aikapisteen muutos verrattuna edellisen. (Termopari).....	76
Kuvio 41: Temperointi.....	77
Kuvio 42: Jäähdytys.....	77
Kuvio 43: Keittojen kuvausviiveet.....	79
Kuvio 44: Kokonaisnäkyvät Vesi- ja nyyttikeittojen 16 minuutin lämpösuorista ...	80
Kuvio 45: Neljän ja kuuden minuutin höyrykeittojen vertailu eri mittalaitteiden tulosten kesken.....	81
Kuvio 46: 8:n ja 10:n minuutin keittojen lämpötilavertailut mittalaitteiden kesken .	82
Kuvio 47: 14:n ja 20:n minuutin keittojen lämpötilavertailut mittalaitteiden kesken	82
Kuvio 48: Jäähdytymisen eteneminen 12 sekunnin aikana .....	83
Kuvio 49. Jäähdytymisen hetkellinen aste reunassa .....	84
Kuvio 50. Jäähdytymisen perunan keskikohdassa 12 sekunnin aikana .....	84
Kuvio 51: Neljän minuutin höyrykeitto, 11 mm reunasta. ....	90
Kuvio 52: Mikroskooppitoksia höyrykeitosta. ....	91
Kuvio 53: Vesikeiton eri vaiheita: .....	92



Kuvio 54: Nyyttikeiton eri vaiheita: .....	93
Kuvio 55: Kypsän solukon sisällä olevaa rihmamaista tärkkelystä.....	95
Kuvio 56: Nyytin nesteestä löytyneitä kuorimaisia osia (v. 6min, o. 16min).(vm) ..	95
Kuvio 57: Rakennemittauksen viitearvot raa'alle ja kypsälle Melody-perunalle.....	97
Kuvio 59: 12 minuutin keittojen keskinäinen rakenteen vertailu .....	98
Kuvio 60: 14 minuutin keittojen rakenteen keskinäinen vertailu .....	99
Kuvio 61: 16 minuutin keittojen keskinäinen vertailu.....	99
Kuvio 62: Höyryssä kypsennetyn perunan rakenteen muutokset valikoituina keittoaikoina.....	100
Kuvio 63: Vedessä kypsennetyn perunan rakenteen muutokset valikoituina keittoaikoina.....	100
Kuvio 64: Höyrynyytissä kypsennetyn perunan rakenteen muutokset valikoituina keittoaikoina.....	100
Kuva 65: Lämpötilan vertailu 12 minuutin keittoajalla eri keittotavoilla.....	103
Kuvio 66: Vesikeitto 12min (reuna-puoliväli-keskikohta) .....	103
Kuvio 67: Höyrykeitto 12 min. (reuna-puoliväli-keskikohta).....	103
Kuvio 68: Nyyttikeitto 12 min (reuna-puoliväli-keskikohta).....	103
Kuvio 69: Kypsymisen kuvausmenetelmän prosessi .....	106
Kuvio 70: 10 minuutin keittojen rakenteiden vertailu ja tulosten keskihajonta.....	113

## Taulukot

Taulukko 1: Perunan koostumus.....	15
Taulukko 2: Ominaislämpökapasiteetti komponenteista .....	40
Taulukko 3: Diffuusiokerroin/koostumus .....	42
Taulukko 4: Vesikeiton muutosnopeuksien keskivirheet ja keskihajonnat .....	67
Taulukko 5: Mittauserot keskikohdassa lämpökameran ja termoparin välillä.....	81
Taulukko 6: Tulkintoja keiton alkuvaiheen mikroskooppikuvista. (minuutti/mm) ...	88
Taulukko 7: Erilaisia vaiheita ennen kypsymistä. (min/mm).....	88
Taulukko 8: Kypsymisen merkkejä.....	89
Taulukko 9: Perunan kypsyysasteen tunnusmerkkejä mikroskooppikuvissa. ....	89

**Laskentakaavat**

Kaava (1) Voima .....	27
Kaava (2) Lämmön johtuminen .....	31
Kaava (3) Lämmön konvektio .....	31
Kaava (4) Fourierin II laki .....	32
Kaava (5) Fourierin luku.....	33
Kaava (6) Biotin luku .....	34
Kaava (7) Nusseltin luku .....	35
Kaava (8) Konvektion lämmönsiirtokerroin .....	35
Kaava (9) Reynoldsin luku .....	38
Kaava (10) Ominaislämpökapasiteetti .....	39
Kaava (11) Lämmönjohtavuus .....	41
Kaava (12) Lämmönjohtavuus Biotin luvun ja lämmönsiirtokertoimen avulla.....	41
Kaava (13) Lämmönjohtavuus /koostumus.....	41
Kaava (14) Lämpötilan tasoittumiskerroin .....	42

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Amyloosi</b>	Tärkkelyksessä oleva pääasiassa lineaarinen polysakkaridi. Tärkkelyksessä on amyloosia yleensä noin 20–30 %
<b>Amylopektiini</b>	Tärkkelyksen D-glukoosiyksiköistä muodostunut haarautuva polysakkaridi. Tärkkelyksessä on amylopektiiniä yleensä noin 70–80 %.
<b>Diffundoituminen</b>	Molekyylien siirtyminen konsentroidummasta tilasta laimeampaan tilaan.
<b>Dimensiottomuus</b>	Dimensiottomalla suureella ei ole fysikaalista yksikköä, koska ne supistuvat pois.
<b>Emissiivisyys</b>	Kappaleen lähettämän säteilyn määrä verrattuna täysin mustan kappaleen säteilyyn.
<b>Endoterminen prosessi</b>	Reaktio, joka sitoo lämpöä.
<b>Epästationäärinen lämmönsiirto</b>	Lämmönsiirtotapahtuma, jossa kappaleen lämpötila muuttuu sekä ajan että paikan suhteen, jolloin kappaleen sisällä todetaan eri lämpötiloja lämmön siirtymisen edetessä.
<b>Faasinmuutos</b>	Faasinmuutos on materiaalin käyttäytymisen poikkeus, joka ilmentää esimerkiksi olomuodon muutosvaihetta.
<b>Gelatinoituminen</b>	Tärkkelyksen olomuodon muutos kiinteästä geelimäiseksi massaksi.
<b>Hemiselluloosa</b>	Heteropolymeeri, jota esiintyy kasvin soluseinissä yhdessä selluloosan kanssa.

<b>Inklusioyhdiste</b>	Inklusioyhdiste on ryhmä, jossa isäntäyhdiste muodostaa ontelon, johon vieras yhdiste asettuu. (jodin reaktio tärkkelyksen kanssa)
<b>Johtuminen</b>	Lämmön siirtyminen aineen sisällä
<b>Kompleksoituminen</b>	Vieraan yhdisteen asettuminen isäntäyhdisteen kierrakenteeseen. (jodin reaktio tärkkelyksen kanssa)
<b>Konvektio</b>	Lämmön siirtyminen fluidissa virtausten mukana.
<b>Kryostaatti</b>	Laite, jolla materiaalia jäädytetään kryogeenisessä lämpötilassa (mikroskopoinnin leikkeiden valmistelu)
<b>Nyyttikeitto</b>	Kypsentaaminen höyryssä ruoanlaittopaperista tehdyssä nyytissä.
<b>Pektiini</b>	Kaikissa kasvikunnan tuotteissa esiintyvä hiilihydraatti, perunan solukoiden rakenneaine.
<b>sm</b>	Stereomikroskooppi
<b>Tärkkelysjyvänen</b>	Tärkkelyspitoisien kasvien solujen sisällä esiintyvä kompakti tärkkelyksen luontainen muoto.
<b>vm</b>	Valomikroskooppi, läpivalaisumikroskooppi

### **Lämmönsiirron yksiulotteisuus**

Lämmönsiirrossa käytetty ratkaisu symmetristen kappaleiden, kuten tasaisen seinän, sylinterin ja pallonmuotoisen kappaleiden epästationäärisen lämmönsiirron määrittämistä varten. Keskipisteen tai keskilinjän suhteen symmetristen kappaleiden sisällä kulkevan lämmön voidaan laskennallisesti tulkita olevan yksiulotteista.

# 1 MENETELMÄN MÄÄRITTELY

## 1.1 Aiheen kuvaus

Kypsymisen kuvausmenetelmä -työn tarkoituksena on luoda pohjaa elintarvikkeen kypsymisprosessin määrittämiselle. Tavoitteena on hakea mitattavia tai todennettavia tekijöitä, joita voidaan käyttää perusteena kypsymisen kuvaamiseen. Tämän työn tutkimuskohteena on peruna.

Kypsymisellä tarkoitetaan tässä työssä kuumentamalla tapahtuvaa ruoka-aineen kypsentämisprosessia, jossa elintarvikkeen entsyymaattinen ja muu mikrobitoiminta pysähtyy, ja sen molekyylirakenteessa tapahtuu peruuttamattomia muutoksia. Lopullinen kypsyys tai kypsyysasteen optimaalisuus on makuasia.

Käytännössä tämä menetelmä lähtee hyvin yksityiskohtaisesta seurannasta, mutta pyrkii pelkistämään tulokset sovellettavaan muotoon. Esimerkiksi, kun tutkitaan erilaista perunalajiketta, voidaan tälle asettaa alkuoletuksena menetelmän mukaiset määrittelyvälit, ja saatuja mittausarvoja voidaan verrata aiemmin kerättyyn tietoon, mikä vähentää työmäärää huomattavasti. Ensimmäisen tehdyn analyysin on tarkoitus antaa lähtökohtia myöhemmille, eri raaka-aineille tehtäville sovelluksille.

## 1.2 Tutkimuskohde

Tämän lopputyön tutkimuskohteeksi on valittu vanhan sadon Melody-perunan kypsyminen kolmella eri kypsennystavalla. Tutkimuksessa on käytetty satovuosien 2010 ja 2011 perunoita, ollen tarkasteluhetkellä edellisen vuoden satoa eli vanhaa perunaa. Melody-perunalajikkeesta todetaan Suomen Siemenperunakeskuksen sivuilla seuraavasti:

Melody on yleiskäyttöinen, keltamaltainen ruokaperuna, joka soveltuu hyvin myös kuorimokäyttöön. Tasakokoiset, matalasilmäiset, kauniin kirkaskuoriset mukulat. Hyvä väri ja muoto. Hyvä maku ja rakenne. Kiinteä tai lievästi jauhoinen. (Suomen Siemenperunakeskus 2012)

### 1.3 Sovelluskohteet

Kypsymisen eteneminen on elintarvikeyrityksille olennainen osa kokemukseen pohjautuvaa rutiininomaista prosessia. Prosessilaitteiston asetukset on usein haettu erilaisilla käytännön keinoilla, esimerkiksi maistamalla tai analysoimalla eri tuoteversioiden rakennetta. Elintarvikkeiden raaka-aineet eivät kuitenkaan ole tasa-laatuksia, jolloin lopputuotteen laatu voi vaihdella esimerkiksi satokausien, lajin tai rodun mukaan. Lisäksi, elintarvikkeiden käyttötavat ja tarpeet muuttuvat, jolloin myös laatuvaatimukset muuttuvat. Raaka-aineen kypsyyssasteen säätäminen juuri oikeanlaiseksi voi olla tuotteen menestyksen avain.

Menetelmää voidaan soveltaa vaikkapa puolivalmisteille, joille haetaan tietty kypsyyssvaihe, jossa raaka-aine pysyy laadukkaana pakastettaessa ja sulattaessa. Raaka-ainekohtaisen tiedon avulla voidaan säätää valmistusprosessin eri osatekijöitä tuottamaan parempaa tuotelaatua.

## 2 KYPYSYMISPROSESSIN OSATEKIJÄT

### 2.1 Peruna tutkimuskohteena

Peruna kuuluu tärkkelyspitoisiin mukulavihanneksiin, jonka mukulat kasvavat maan alla. Perunan pääkomponentit ovat soluneste (70 %), tärkkelys (10–15 %) ja kuitu (2-3 %). Tärkkelystä on runsaasti kasvien solukoissa, koska sillä on tärkeä rooli hiilihydraattivarastona. (Saarela, ym. 2005, 154.) Sitä esiintyy erimuotoisina ja kokoisina jyväsinä, kasvilajista riippuen (Coultrate 2009, 51). Perunassa tärkkelysjyvät ovat yksittäisinä jyväsinä solurakkuloiden sisällä. Perunasta on löydetty kaiken kaikkiaan 200 erilaista aineosaa (RÖMPP 2006). Taulukossa 1 on viitteellisenä tietona eräs tuoreen perunan koostumuslista.

Taulukko 1: Perunan koostumus

Aineosa	Keskimääräiset arvot
	[% tuorepainosta]
Vesi	77
Tärkkelys	15
Proteiini	2
orgaaniset hapot	1,5
Mineraalit	1
aminohapot	0,8
Polysakkaridit (muut kuin tärkkelys)	0,7
Sokeri	0,5
Rasvat	0,2
Polyfenolit	0,2
alkaloidit	0,01

(RÖMPP 2006)

Perunalajikkeissa on kolme päätyyppiä: Jauhoiset ja kiinteät perunat, ja niiden välimuoto jota kutsutaan yleisperunaksi. Näiden rakenteessa on suuria eroja, johtuen tärkkelyksen määrien eroavaisuuksista ja sen sijoittumisesta perunassa. Jauhoisten perunoiden solut sisältävät enemmän tärkkelystä, ja kypsyessään solut turpoavat ja irtoavat toisistaan tuottaen kuivan ja kuohkean rakenteen. Kiinteiden perunoiden solut pysyvät kiinni toisissaan myös kypsennettäessä, mikä antaa niille kiinteän ja mehukkaan rakenteen. (McGee 2004, 302-303.) Perunalajikkeiden laatu vaihtelee satovuosittain, jolloin määritelmät voivat vaihtua tyyppistä toiseen. Tä-

män vuoksi kypsymisominaisuuksia ei aina voi taata pelkän lajikkeen perusteella. (Ahvenniemi 2012.) Perunoiden lajikkeen perimä on kuitenkin vahva, eli pääsääntöisesti tietty lajike on jotakin näistä kolmesta tyyppistä (Vreugdenhil ja Bradshaw 2007, 109).

Perunoiden rakenne perustuu kolmeen seikkaan: Ensimmäinen on solukon sisäinen veden paine eli nestejäännitys ja toinen on soluseinien ja niiden väliaineen rakenne. Kolmanneksi, koska perunoiden tärkein kiinteä komponentti on hiilihydraatti, niiden rakenne pysyy muodossaan myös kypsennysvaiheessa, jolloin tärkkelys levittäytyy rakenteisiin täyttäen ne. (McGee 2004, 265, 278.) Käytännössä siis nestejäännityksen ylläpitämä rakenne korvautuu gelatinoituneella tärkkelysverkostolla.

Perunan perussolukudos muodostuu polygonaalin muotoisten solujen kokonaisuuksista. Solujen seinämät ja soluja toisissaan kiinni pitävät välilamellit koostuvat pääasiassa:

- selluloosasta,
- hemiselluloosasta,
- pektiineistä,
- ligniinistä
- rakenneproteiineista
- entsyymeistä

Selluloosa on näistä kaikkein kestävin, käytännössä liukenematon soluseinän rakenneosana. Pekiineillä ja hemiselluloosalla puolestaan on merkittävä osa välilamellien rakenteesta. (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 1006-1007.) Soluseinien sisällä on tärkkelysjvärykelmiä. Vesi, joka on vallitseva ainesosa perunan kudoksissa, on sijoittunut pääasiassa solurakkuloihin (84 %), ja loput tärkkelysjväsiin (13 %) ja soluseiniin (3 %). (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 126.)



## 2.2 Kypsymisen muutokset solutasolla

Tämä osio selventää niitä perunassa kypsymisen myötä tapahtuvia muutoksia, joihin tutkimustulosten yhteydessä myöhemmin viitataan. Jodin reaktio tärkkelyksen kanssa käydään läpi erityisesti sen vuoksi, että olisi mahdollista ymmärtää eri vaiheista kuvattuja mikroskooppikuvia.

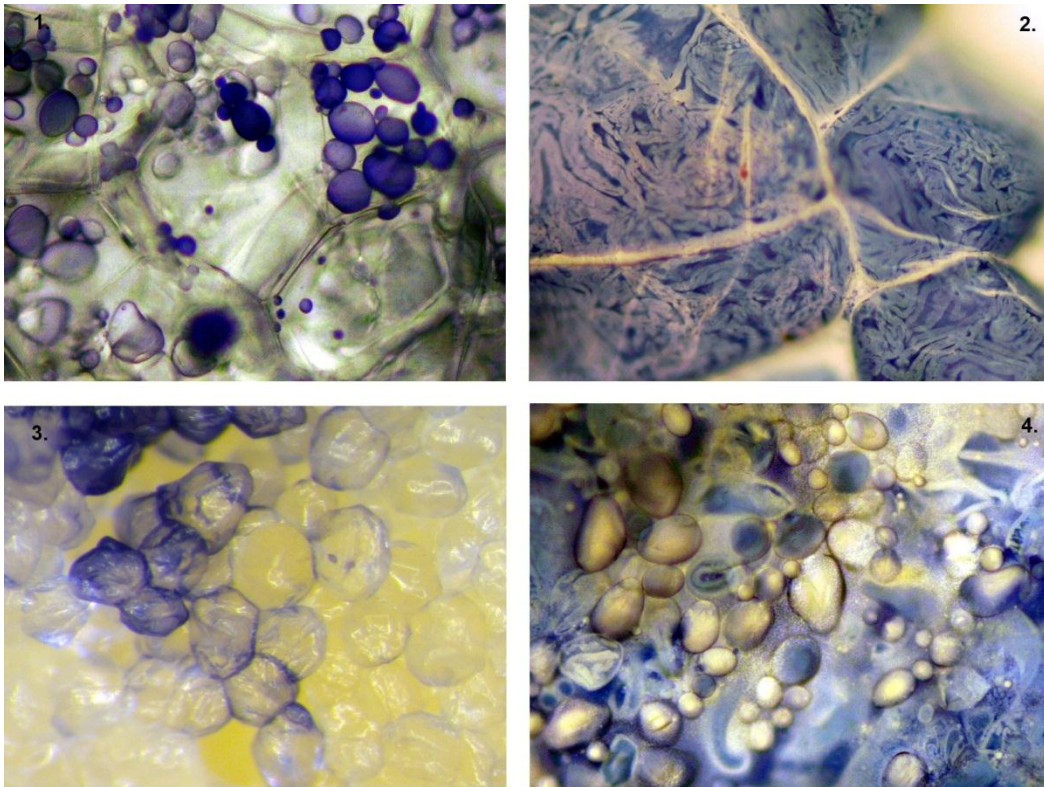
### 2.2.1 Kypsymistapahtuma

Koska peruna on tärkkelyspitoinen vihannes, tärkkelyksen gelatinoituminen ja solujen tukirakenteiden muutokset kulkevat kypsymistapahtumassa käsi kädessä. Kuumentaminen pehmentää perunan solukkoja vapauttamalla veden painetta ja pehmentämällä solurakenteita. Kun solukudos saavuttaa 60 °C lämpötilan, solua tukevat rakenneproteiinit denaturoituvat, solut alkavat luovuttaa vettä, ja solukon rakenne alkaa muuttua. (McGee 2004, 282-283.) Raa'assa perunassa tärkkelysjuväset ovat kovia, tiiviitä mikroskooppisia tärkkelysmolekyyliyrkelmiä, liitumaista ainetta. Ne alkavat pehmetä suurin piirtein samassa lämpötilassa kuin solukalvon proteiinit denaturoituvat. (Flint 1994, 46.)

Kypsymisen alkuvaiheessa vihannekset usein narskuvat hampaissa: Ne ovat menettäneet jänteveytensä, mutta soluseinät ovat vielä koossa ja vastustavat pureskelua. Kun solukko lähestyy kiehumispisteen lämpötilaa, soluseinät alkavat pehmetä. Koska selluloosa hajoo vasta noin 320 °C:n lämpötilassa (Deguchi; Tsuijii ja Horikoshi 2006), solun selluloosarunko pysyy pääosin ehjänä, mutta pektiini ja hemiselluloosa pehmenevät hajoten lyhemmiksi ketjuiksi ja liukenevat. Tällöin hampaat työntävät helposti vierekkäin olevat solut irti toisistaan, ja rakenne on pehmeää. (McGee 2004, 278.)

Kuumennettaessa kasvin solukudosten vesimäärä riittää yleensä tärkkelysjuvästen gelatinoitumiseen solun sisällä, mutta ympäröivät soluseinät rajoittavat juvästen turpoamista. Kun tärkkelysjuvästen määrä solujen sisällä on korkea, solujen sisälle aiheutuu niiden turvotessa huomattava sisäinen paine (arvioitu noin 100 kPa). Turpoamispaineesta huolimatta solut eivät hajoa, mutta ne pyöristyvät pallomaisiksi. Jos kuitenkin tärkkelysjuväsiä on vain vähän, solujen muoto ei muutu. Soluseinien pyöristyminen mahdollistuu samanaikaisesti, kun solujen välilamelleissa

olevan pektiinin määrä alenee liukenemisen myötä. (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 126-127.)



Kuvio 1. Eri kypsyisvaiheissa olevaa perunan solukkoa.

Mikroskooppikuvia: 1: Raakaa perunaa (vm), 2. Kypsää (vm), 3. Kypsää (sm), 4. Muuntautumassa olevaa tärkkelystä (vm).<sup>1</sup>

Tärkkelyspitoiset vihannekset saavat kypsyessään ominaisen rakenteensa tärkkelyksen ansiosta. Perunan korkea tärkkelysmäärä ja tärkkelysjyvästen voimakas turpoaminen aiheuttaa kypsälle perunalle pehmeän ja murenevan rakenteen. Solun pyöristymisilmiö aiheuttaa fysikaalista painetta osittain vähentyneelle ja heikentyneelle välilamellille, mikä edesauttaa solujen erkanemista toisistaan tai kudoksen lohkeamista. Korkea tärkkelyspitoisuus ja turpoamiskapasiteetti sitovat enemmän kosteutta aiheuttaen kuivan suutuntuman. Tärkkelyksen gelatinoitumisella on tärkeä merkitys perunan rakenteeseen ja käyttöpotentiaaleihin sen toissijaisessa roolissaan rakenteen pehmentäjänä (solujen pyöristyminen) ja veden sitojana. (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 127.)

<sup>1</sup> vm= valomikroskooppi, sm= stereomikroskooppi

## 2.2.2 Tärkkelyksen gelatinoituminen



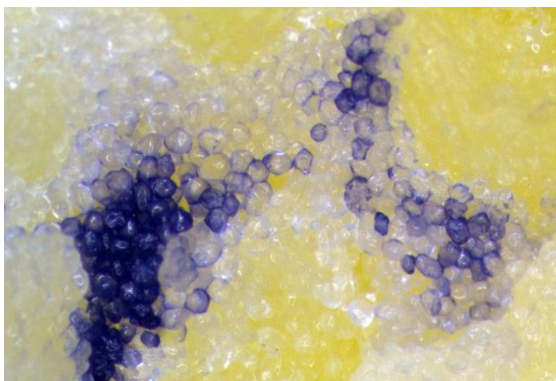
Kuvio 2. Jodiliuoksella sivelty, pari minuuttia keitetty ja halkaistu peruna.

Perunan kypsymisprosessissa ensimmäinen tärkeä havaittava muutos on tärkkelyksen rakenteen muuttuminen. Muutos on havaittavissa myös paljaalla silmällä, jos katsoo halkaistua muutaman minuutin ajan keitettyä perunaa. Perunan tärkkelys kuuluu eri kasvien tärkkelyksistä alhaisimmissa lämpötiloissa gelatinoituviiin tärkkelyksiin, ja sen liisteröityvyys on voimakasta (Eliasson 2004, 241); (Flint 1994, 46). Perunan tärkkelyksen gelatinoitumislämpötilat vaihtelevat lajikkeittain, ja lähdetiedoissa lämpötilat voivat poiketa jonkin verran toisistaan. Flintin mukaan perunan tärkkelyksen gelatinoitumisen lämpötila-alue on 58–68 °C. Natiivissa ympäristössään tärkkelys kuitenkin gelatinoituu korkeammissa lämpötiloissa kuin eristetty tärkkelys. Tämän sanotaan johtuvan solunesteen koostumuksesta; toisin sanoen siihen liuenneista aineosista. (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 126.) Tällä lämpötila-alueella tärkkelysjyvät alkavat imeä vesimolekyyliä, jotka rikkovat tärkkelyksen kompaktin rakenteen. Jyvät alkavat paisua moninkertaisiksi alkuperäiseen kokoonsa verrattuna. Niistä muodostuu pehmeää geelimäistä ainetta tai sienimäistä vettä ”taskuissaan” pidättävää verkostoa.

Tärkkelys on glukoosiyksiköistä rakentunut polymeeri, polysakkaridi. Glukoosi on rakenteeltaan rengasmaisen hapen sisältävä hiilivety. Tärkkelyksestä voidaan kemiallisella tasolla edelleen erottaa amyloosi ja amylopektiini. Amyloosi on kytkeytynyt lineaarisesti  $\alpha$  (1,4) sidoksella ja haaroittunut amylopektiini, jonka haaroituspisteissä sidos on muodostunut hiiliatomien 1 ja 6 välille ( $\alpha$ (1,6)sidos). Lämpötilan noustessa tärkkelysjyvänen turpoaa ja osa amyloosista diffundoituu ulos

jyväsestä. (Belitz;Grosch ja Schieberle 2004, 320.) Lopulta jyvänen puhkeaa rikki, tärkkelyskiteet sulavat ja muodostavat polymeeriverkoston.

Tärkkelyksen kiteytyessä kaksi glukoosiketjua kietoutuu toistensa ympäri muodostaen kaksoiskierteen. Perunassa kiteiset tärkkelysrakenteet koostuvat pääasiassa amylopektiinistä ja amorfiset rakenteet amyloosista. Perunan tärkkelyksen kiderakenne on heksagonaalinen, ja kiderakenteen vesimolekyylit ovat sitoutuneet glukoosiin eivätkä pääse liikkumaan. (Ikonen 2002.) Amorfisessa tärkkelyksessä (amyloosi) vesi muodostaa myös vetysidoksia glukoosiketjujen välille toimien eräänlaisena voiteluaineena, joka vähentää rakenteen viskositeettia (Coulter 2009, 49-51). Kaiken kaikkiaan tärkkelyksen gelatinoitumisprosessin lopputuloksena on pehmeä, mutta kuivahko rakenne, koska solukon kosteus on imeytynyt tärkkelykseen. Tärkkelyspitoisissa vihanneksissa, joilla on suhteellisen elastiset soluseinät, gelatinoituneella tärkkelyksellä täyttyneet solut voivat olla kuitenkin riittävän koossapysyviä työnnyäkseen irti toisistaan kuin erilliset pikku partikkelit. (McGee 2004, 283.)



Kuvio 3. Kypsän jauhomaisen perunan irtonaisia partikkelimaisia soluja (jodivärjätty).(sm)

### **Jodi perunan kypsymisen muutoksissa**

Tärkkelyksellä on monia tunnusomaisia ominaisuuksia, joista erityisesti reaktio jodin kanssa on parhaiten tunnettu. Jodi värjää tärkkelysjyvät violetin/tumman siniseksi, mutta reaktio on kaikkein voimakkain tärkkelyksen amyloosikomponentin kanssa. Reaktion lopputuloksena on voimakkaan sininen väri.

Jodi [I] kompleksoituu sekä amyloosin että amylopektiinin kanssa. Kun amyloosia ei ole läsnä, tärkkelyksen amylopektiini värjäytyy punertavaksi. Amylopektiini muodostaa punertavan värin jodin kanssa, koska amylopektiiniketjun haarat ovat lyhyitä. (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 128.) Reaktiossa syntyy "joditärkkelys", inkluusioyhdiste, jonka värin tummuus riippuu konsentraatiosta (Coultate 2009, 55).

Jodin aiheuttama värimuutos aiheutuu jodimolekyylien sitoutumisesta glukoosiketjujen muodostamien kaksoiskierteiden välisiin onkaloihin (Lampiselkä, ym. 2006, 19). Toisin sanoen, jodin läsnäolo aiheuttaa amyloosiketjujen stabiloitumisen kierreasetelmaan (helix), jonka jokaisella kierteellä on kuusi glukoosiyksikköä jodimolekyylien kompleksoituessa kierteen keskelle. Amyloosin pitkät kierreketjut mahdollistavat pitkien polyjodi ( $I_3^-$ )-ketjujen muodostumisen, ja tuottavat voimakkaan sinisen värin. (Coultate 2009, 55.) Inkluusioyhdiste kuitenkin hajoaa lämmön vaikutuksesta (RÖMPP 2006). Jodin sublimoituminen alkaa noin 20 °C:ssa (Tamro 2012). Jodin höyrynpaine huoneenlämmössä on niin suuri, että sublimoituminen on helppo havaita. Huoneenlämmössä jodi sublimoituu siten, että sen höyrynpaine on noin 0,20 torr = 27 Pa (Jyväskylän yliopisto 2012), ja 25 asteessa se on jo 40 Pa (TTL 2012).

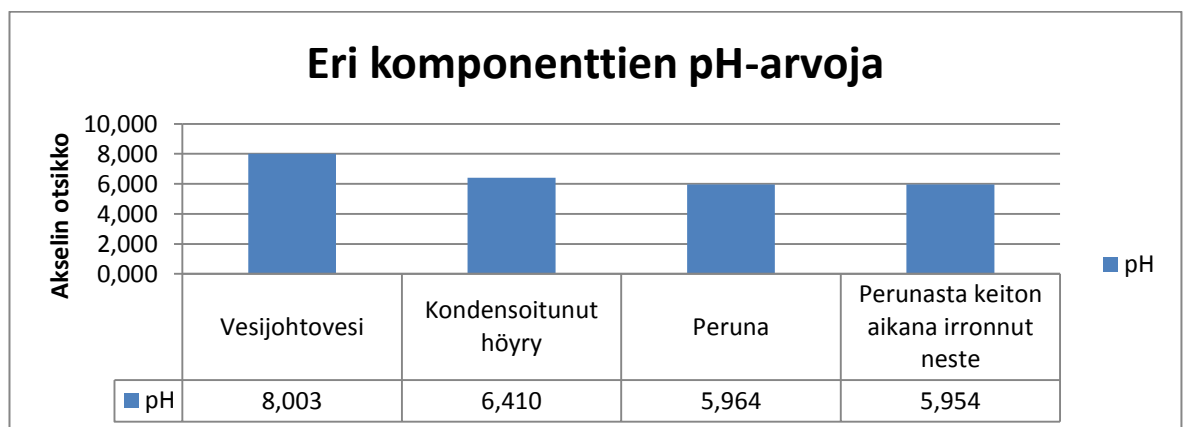
Mikroskopointia ajatellen gelatinoitumisprosessissa jodi ilmaisee tärkkelysjyvästen vapauttaman amyloosin. Amyloosin vapautuminen puolestaan mahdollistaa tärkkelyksen gelatinoitumisen. (Flint 1994, 46-47.)

### **2.2.3 Veden laadun ja pH:n vaikutukset perunan kypsymiseen**

Soluseinien väliaineiden liukenemiseen eli perunan kypsymisen pehmentymisvaiheeseen vaikuttaa vahvasti kypsentämisen kemialliset olosuhteet. Hemiselluloosat eivät ole kovin liukenevia happamissa olosuhteissa, mutta emäksisissä kyllä. Tämä tarkoittaa, että happamassa vedessä keitetty vihannes ei ehkä pehmene kunnolla useiden tuntienkaan keitossa, kun puolestaan neutraalissa keittovedessä se pehmenee normaaliin tahtiin. Emäksisessä vedessä vihanneksen rakenne alkaa hajota muusiksi. Jos neutraalissa vedessä on suolaa, se nopeuttaa pehmenemistä. Tämä aiheutunee siitä, että suolan natriumionit korvaavat solujen sideaineita

silloittavat kalsiumionit, jolloin sillat rikkoutuvat ja hemiselluloosat pääsevät liukenemaan. (McGee 2004, 282-383.)

Paikallinen vesijohtovesi on pH-arvoltaan noin 8 (Seinäjoen Vesi 2012), jolloin vedessä keitetty peruna saa hieman emäksiset olosuhteet. Perunan oma pH-arvo puolestaan on luontaisesti lievästi hapan. Tyypillisesti perunan pH on 5–6. Sen kasvatusolosuhteita pyritään pitämään happamana erilaisten tautien vaaran vuoksi (Ahvenniemi 2012).



Kuvio 4. Työn tekemisen ajankohtana (2012) mitatut veden, höyryn ja perunan pH-arvot

Perunoiden heikkous on se, että niiden ulkokerroksilla on taipumusta pehmentyä liikaa, kun keskiosat vasta kypsyvät. Perunoiden keitossa on eduksi joko kova tai lievästi hapan vesi, jolloin pinta pysyy paremmin ehjänä. Paikallisen veden kovuus on, 1,7 °dH tai 0,3–0,5 mmol/l, eli vesi on pehmeää. Perunoiden kypsymiseen tulisi riittää jo 80–85 °C lämpötilan saavuttaminen, jolloin tärkkelys on gelatinoitunut ja soluseinät pehmenneet. Tällöin ulkokerrokset eivät vielä ehdi ylikypsyä. (McGee 2004, 285.)

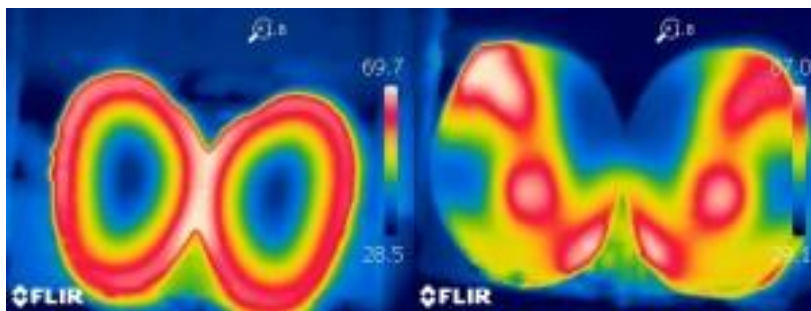
### 3 TUTKIMUSMENETELMÄT

#### 3.1 Työn suunnittelu ja menetelmien muotoutuminen

Tämän työn suunnittelu käynnistyi hyvin avoimin lähtökohdin kypsymisen kuvausmenetelmänä, jossa itse tutkittava raaka-aine, kypsennystavat ja niiden seuranta- tavat ja välineet tuli ratkaista. Raaka-aine, peruna, valittiin kuitenkin ensimmäise- nä. Lähtökohtina perunan tutkimiselle olivat lämmön etenemisen ja perunan raken- teessa tapahtuvien muutosten seuranta. Pyrkimyksenä oli karsia muuttuvia tekijöi- tä siten, että varsinaiset kypsymisen aikana tapahtuvat muutokset saataisiin sel- keämmin esille.

##### 3.1.1 Perunan muodon ja tutkittavien kypsennystapojen valinta

Suunnittelun esitesteissä tutkittiin erilaisia perunan muotoja, joista seuranta olisi paras toteuttaa. Kokeiltiin esimerkiksi eristemateriaaliin upotettua omenaporalla otettua sylinterin muotoista otosta, jonka tuli kypsyä yksiulotteisesti vain toisesta päästä. Ajatuksena oli, että lämmön etenemistä voisi seurata reaaliaikaisesti. Sa- masta sylinterin muotoisesta kappaleesta voisi tämän jälkeen viipaloida kerrokset mikroskoopin lasille, ja dokumentoida lämmön etenemisen vaiheet. Idea vaikutti hyvältä, mutta eristemateriaali kutistui kuumennettaessa, ja se täytyi hylätä. Myös kuutio ja kokoperuna olivat alustavissa testeissä mukana.



Kuvio 5. Lämpökuvat vedessä (vas) ja mikrossa kuumennetusta (oik) perunasta.

Erilaisia kypsennystapoja oli esisuunnittelussa useampia vaihtoehtoja kuin lopulli- set kolme. Näistä karsiutui pois mikroaaltokypsennys sen vuoksi, että kypsymiselle ei löytynyt symmetriaa erilaisista ripustus- ja asetteluviritelmistä huolimatta (Kuvio

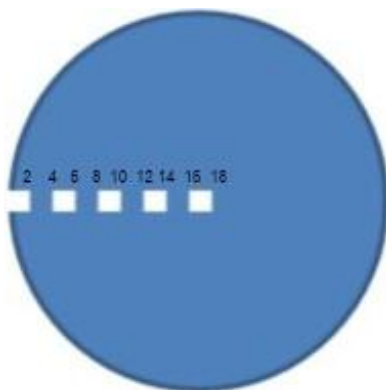
5). Sous Vide puolestaan karsiutui ajanpuutteen vuoksi: Verrattuna muihin se vie reilusti enemmän aikaa.

Lopullisiksi seurattaviksi kypsennystavoiksi valikoituivat:

- perinteinen vesikeitto
- höyrykeitto
- höyrykeitto paperinyytissä.

Käytetty paperi oli SAGA-ruoanlaittopaperi, joka on leivinpaperista jatkojalostettu tuote. Paperin irroke muodostaa suojan rasvaa ja kosteutta ja esimerkiksi lihan ja kalan proteiineja vastaan. Tämä paperi soveltuu kaikenlaiseen ruoanlaittoon, esimerkiksi kevyeen paistamiseen paistinpannulla, ja leivontaan, ruoan valmisteluun, kylmäkeittiöön ja säilytykseen. Paperi säilyttää kypsennettävän perunan kosteuden paperinyytin sisällä, ja eristää sen ulkopuolelta tulevalta kosteudelta keiton aikana. (Sagacook 2012.)

Kypsennystapojen valinnan myötä juuri symmetria valikoitui olennaiseksi tekijäksi, jolloin tutkimuskohteen muodoksi valittiin pallo. Symmetrinen pallonmuotoinen peruna mahdollistaa lämmönsiirtymisen seurannan laskennallisesti yksiulotteisena, jolloin seurataan lämmön etenemistä reunasta keskipisteeseen



Kuvio 6. Pallon säteen mittauspisteet

### 3.1.2 Rakenteen ja solutason muutosten seurannan menetelmäkehitys

Alkuoletuksena tässä työssä oli, että rakenteen ja solutason muutosten seuranta tehdään lämmönsiirtymisen tutkimuksen pohjalta. Erityisesti mikroskopoinnin me-



netelmiä kehitettiin kuitenkin lämmönsiirtymisen tutkimusten ohella, jolloin näiden synergiaa saattoi havainnoida. Lämmönsiirtymisen seurannasta tulikin keskeinen osa koko menetelmää. Lämmön siirtymistiedon pohjalta on mahdollista mallintaa lämmön eteneminen, jolloin rakenteen ja solumuutosten seuranta voitaisiin ennustaa. Koska mallintaminen on kuitenkin täysin oma kokonaisuutensa, tässä työssä rakenteen ja solumuutosten seurannassa päädyttiin yksinkertaisesti noudattamaan samaa symmetriaa kuin lämmön siirtymisen seurannassa, jolloin kaikkia tuloksia voidaan verrata keskenään yhdellä seurantajanalla reunasta keskipisteeseen.

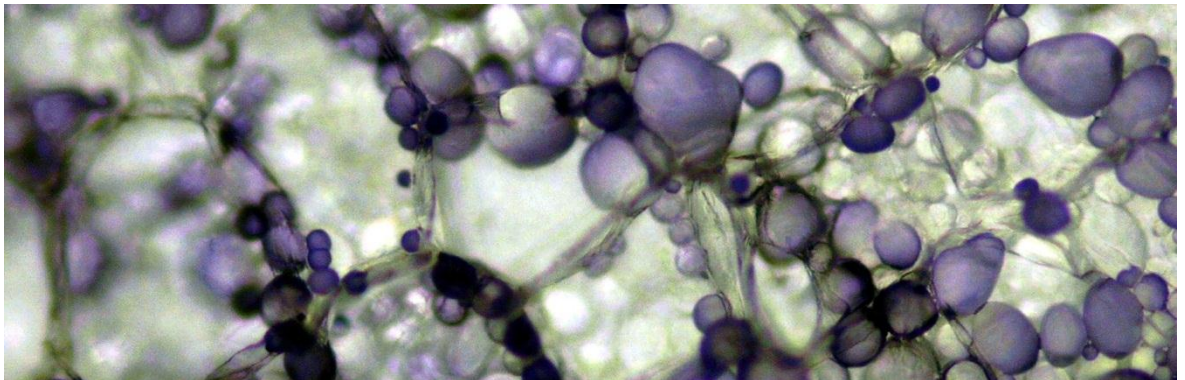
Kypsyvän perunan rakenteen tutkimisessa yhtenä keskeisenä ongelmana oli näytteen hetkellisyys ja muuttuvuus, mikä toi haasteita menetelmien kehittämiseen. Mikroskopointi oli heti alussa oletettuna seurantamenetelmänä mukana, ja menetelytavat, värjäystekniikka ja välineet muotoutuivat erilaisten testikuvausten myötä. Toiseksi mittausmenetelmäksi valittiin rakennemittari, jonka mitta-anturiksi valikoitui sylinteripiikki: Sylinteri porautuu halkaistun perunan ulkopinnan korkeimmasta kohdasta kohti keskustaa, tuottaen dataa samassa symmetriassa kuin lämpökuvausten data.

### **3.2 Mikroskopointi**

Ruuan mikroskopoinnissa on usein tärkeää se, että tutkittavan kohteen rakenne ja olotila pystyttäisiin siirtämään mahdollisimman muuttumattomana mikroskoopin lasille. Usein hyvin hauras rakenne tuottaakin mikroskopoinnin suunnittelulle haasteita. Erilaiset perinteiset histologiset menetelmät, joissa rakenteisiin lisätään vaha tai hartsia eivät sovi ruuan tutkimiseen kovin hyvin. Näin ollen ruuan mikroskopoinnissa olennaista on, että mitä vähemmän käsittelyä ruoka-aineelle tehdään ennen sen tutkimista, sitä parempi. Yleensä tutkimuksessa täytyy myös olla nopea, jotta ruoka-aineen ohikiitävä olotila ei ehdi muuttua. (Flint 1994, 3.)

Useimmiten ruuan rakennetta tutkittaessa käytetään leikkeitä. Tutkittaessa ruoka-näytettä valomikroskoopilla sen on oltava läpikuultava, ja valaistus on säädettävä sopivaksi. Näin ollen leikkeen tulee olla hyvin ohut, tai siitä täytyy ottaa esimerkiksi sivelnäyte. Läpikuultavuus riippuu ruuan laadusta. Jotkut hyvin tiheät ruoka-aineet täytyy leikata kryostaatilla hyvin ohuiksi leikkeiksi (Flint 1994, 13). Raaka

perunan solukko osoittautui hyvinkin läpikuultavaksi, ja valaistuksen säädöllä myös kypsän solukon tutkiminen valomikroskoopilla onnistui.



Kuvio 7. Perunan solukko on läpikuultavaa.

Mikroskoopin avulla voidaan seurata erityisesti tärkkelyksen gelatinoitumista, ja siihen on olemassa useampia vaihtoehtoja. Peruna itsessään on materiaalina kauttaaltaan vaaleaa, jolloin mikroskooppikuvassa on vaikeaa erottaa yksityiskohtia. Tärkkelyksen yksi erikoinen ominaisuus on kahtaistaitteisuus: Intaktit tärkkelysjyvät ovat kahtaistaitteisia, jolloin tärkkelysjyvässä voidaan nähdä Maltan ristikuvio polarisoivan valon avulla. Tärkkelysjyvät menettävät tämän ominaisuuden gelatinoituessaan, minkä vuoksi tämä ominaisuus on hyvä gelatinoitumisen mittari (Flint 1994, 41-42).

Värjäysmenetelmän valinta on olennainen siksi, että oikealla värjäyksellä saadaan näkyville ne asiat, joita halutaan tutkia. Tällainen täsmävärjääjä on esimerkiksi trypaaninsininen: kun mikroskooppinäyte värjätään trypaaninsinisellä, värjäytyvät ainoastaan turvonneet tärkkelysjyvät muuttumattomien pysyessä entisellään. (Flint 1994, 47). Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan ole käytetty tätä, vaan helposti saatavilla olevaa jodia. Jodi toimii erittäin hyvin antaen riittävän hyvää kontrastia, jonka avulla saadaan havainnollisia kuvia perunan kypsymisestä; tässä tutkimuksessa ei ole kyse pelkästä tärkkelyksen gelatinoitumisesta.

Jodin käyttö vaatii harjoittelua, sillä yksityiskohtien näkyvyys riippuu jodin konsentraatiosta. Jos käytetään jodiliuoksia, tulisi käyttää vahvuudeltaan erilaisia konsentraatioita, riippuen siitä mitä halutaan näkyville. Esimerkiksi 1 %:n jodiliuos osoittaa välittömästi tärkkelyksen mustansinisellä värillään, mutta peittää kaiken kahtaistaitteisuuden. Toisaalta, hyvin alhainen konsentraatio pystyy värjäämään vain muut-

tuneen tärkkelyksen, kun ehjät tärkkelysjuväset jäävät värjäytymättä. (Flint 1994, 29.) Käytettäessä jodihöyryä, värjäytymisen nopeutta voidaan säätää sopivalla määrällä jodikiteitä, jolloin värjättävät leikkeet poistetaan kammiosta valitulla hetkellä. Toisaalta, jodin haihtuminen huoneenlämmössä on nopeaa, jolloin saavutettu värjäystaso on vain ohimenevä.

### 3.3 Rakenteen muutosten mittaaminen

Perunan kypsyyttä kokeillaan perinteisesti haarukalla, jolloin mitta-anturina toimii oma tuntoaisti. Harjaantumisen myötä oppii aistimaan perunan kypsyiden pistotuntumalla. Rakennemittari tuottaa mekaanisesti samankaltaisen arvion elintarvikkeen rakenteesta, mutta sen antama data on verrattavissa toisiin mittauksiin. Rakennemittarin käytössä tärkeää on valita tarkoitukseen soveltuvat anturit, joilla pystytään mittaamaan kyseiselle elintarvikkeelle tärkeitä ominaisuuksia, ja jotta saatu informaatio soveltuisi kokeen tarkoitukseen.

Tutkittavien elintarvikenäytteiden tulisi olla testattaessa samassa lämpötilassa ja samankokoisia kappaleita. Elintarvikkeiden heterogeenisyys myös edellyttää suurempaa määrää testejä, jotta testi olisi luotettava. (Stable Micro Systems 2012)

Rakenteesta voidaan tutkia hyvin erilaisia ominaisuuksia. Perunan kypsymisen testaamiseen soveltuu kuitenkin yksinkertaisesti rakenteiden vastuksen vaatiman voiman mittaaminen.

$F = ma$

Kaava (1) Voima

- 
- $F =$  Voima (N)
  - $a =$  kiihtyvyys ( $s^2$ )
  - $m =$  massa (kg)

Erilaisista rakennemittarin menetelmistä poimituna perunan kypsyyttä voidaan testata esimerkiksi näillä kolmella eri tavalla:

- murskaamalla leveällä bulkkisylinterillä
- halkaisemalla leveällä terällä
- lävistämällä kapealla sylinterillä

Murskaaminen kertoo tarvittavan voiman, jolla koko peruna murskaantuu, ja se on parhaiten verrattavissa aistinvaraiseen arviointiin. Murskaantumistestejä käytetään usein vertailutietona leikkaavien tai lävistävien testien ohella, sillä murskaantumistesti kertoo materiaalin keskiarvoisen rakenteen. Kerran murskattua näytettä ei voi testata uudestaan. Halkaisutestissä halkaistaan koko kappale leveällä terällä, jolloin saadaan tietoa kappaleen kokonaisrakenteesta pystysuorassa suunnassa, eli saatu data on keskiarvoja koko pystysuoran halkaisualueen vaakakerrosten rakenteesta. Lävistystestissä kapea piikkimäinen sylinteri ottaa rakennenyhteen pistämällä sylinterin näytteen läpi, jolloin peruna itsessään pysyy ehjänä, ja mittatieto tulee pelkästään valitusta kohdasta. (Kilcast 2004, 109-113.);(Stable Micro Systems 2012.)

### 3.4 Lämmön etenemisen osatekijät

Tässä osiossa esitellään lämmön etenemisen tekijöitä sekä kokonaisena lämmönsiirtotapahtumana, olosuhteiden näkökulmasta että itse tutkittavan kohteen näkökulmasta. Lämmönsiirtoanalyysin pohjalta on tavoitteena määrittää tutkimuskohteen lämmönsiirtymisen ominaisuuksia käyttämällä hyväksi tehtyjä mittauksia. Yksi kunnianhimoisimmista tavoitteista on määrittää perunan lämmönjohtavuus eri seurantapisteeissä. Tavoitteen saavuttamiseksi tarvitaan tietoa käytetyistä kypsennystavoista, olosuhteista ja materiaalista.

#### 3.4.1 Lämmön siirtymisen seuranta

Lämpökamera valittiin keskeiseksi seurantavälineeksi, koska se mahdollistaa lämmön asteittaisen etenemisen havainnoinnin halkaistusta perunasta. Lämpökameran käytön esitesteissä tiedostettiin materiaalin haihtumisen tuoma lämpöhäviö, minkä vuoksi testattiin esimerkiksi folion käyttöä. Folio aiheutti kuitenkin kuvaustahtuman hidastumista ja epätarkkuutta perunan reunan havaitsemisessa, minkä vuoksi folio jouduttiin hylkäämään.

Termopari puolestaan otettiin mittausten vertailutiedoksi. Koska peruna on materiaalina pehmenevää, ja mitattava peruna oli kohtuullisen pieni, ei termoparimitausta kuitenkaan lopulta toteutettu muualta kuin perunan keskikohdasta.

**Lämpökameran toiminta.** Lämpökamera mittaa kohtaamansa pinnan lämpösäteilyä, joka voidaan lämpökamerassa todeta väreinä. Lämpökamera mittaa infrapuna-alueella olevaa säteilyä, josta käytetään myös nimeä lämpösäteily. Se on silmälle näkymätöntä säteilyä, jonka aallonpituus on noin 2-13  $\mu\text{m}$ . (Flir Systems 2007.) Lämpösäteily johtuu atomien ja molekyylien värähtelystä kappaleessa eli lämpöliikkeestä.

Eri materiaaleilla on erilainen emissiivisyys, jota kutsutaan emissiokertoimeksi  $\epsilon$ . Emissiivisyys tarkoittaa materiaalin säteilytason suhdetta samassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen säteilytehoon. Lämpökameran mittausvirheitä pyritään pienentämään säätämällä emissiivisyyden arvoa. Arvo voi vaihdella välillä 0-1. Kun kappaleen emissiivisyys on lähellä yhtä, sitä kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Musta kappale ei heijasta säteilyä, vaan absorboi kaiken itseensä kohdistuvan

säteilyn. Väriämpötila on se lämpötila, johon musta kappale tulee lämmittää, jotta saavutetaan sama näkyvä aallonpituus. Kun mustan kappaleen säteilylämpötila ylittää 525 °C, se alkaa muuttua näkyväksi. Kappale muuttuu kuumentuessaan ensin punahehkuseksi ja siitä lämpötilan yhä noustessa oranssista keltaiseksi. (Flir Systems 2007.)

Emissiivisyyden määrittäminen tulee tehdä aina, kun kohteena on uusi materiaali. Yksi tapa on kiinnittää kappaleeseen teippi jolla on suuri emissiivisyys ja annetaan sen lämpötilan tasaantua mitattavan kohteen mukaiseksi. Tämän jälkeen lämpökameralla mitataan lämpötila sekä teipin pinnasta että kohteesta, jonka emissiivisyys halutaan selvittää. Kameran emissiivisyysarvoa muutetaan kunnes kamera antaa kohteelle saman lämpötila-arvon kuin teipatulle pinnalle. Kappaleen emissiivisyys on se arvo, jolla kamera antaa saman lämpötila-arvon kuin teipin pinnasta mitattuna. (Flir Systems 2007.)

Tämän työn alustavissa testeissä testattiin perunan emissiivisyyttä käyttämällä mustaa sähköteippiä. Näiden testien perusteella emissiivisyyden arvoksi määritettiin 0,90. Myöhemmin tämä arvo löytyi myös lähdetiedosta, joten arvon määrittäminen vaikutti olevan oikeasuuntainen. Alkuperäinen lähde tosin oli melko vanha. (The University of Arizona 2007); perustuu lähteeseen (Charm 1963))

**Termopari.** Termoparit ovat hyvin yleisesti käytettyjä lämpötila-antureita. Termoparin käytön etuna on mittauksen kohdistamisen tarkka mahdollisuus, jos vain pystyy ratkaisemaan termoparielementin kiinnitysongelman.

Termoelementin toiminta perustuu kahden eri metallin liitoksessa syntyvään jännitteeseen, joka on riippuvainen lämpötilasta. Tämä pätee miltei kaikille metalleille, mutta yleensä käytetään tiettyjä hyviksi tunnettuja tyyppisiä, esimerkiksi Nikkeli-kromi /Nikkeli-alumiini on tavallinen yhdistelmä. (Pietiko Oy 2012.)

Termopari mittaa aina lämpötilaeroa mitattavassa kohteessa olevan liitoksen ja mittarin luona olevan liitoksen välillä. Standardit ilmoittavat termoparin tuottaman jännitteen, kun mittarin puoleinen pää on 0 °C asteessa. Kohteen lämpötila saadaan lisäämällä mittaripään lämpötilaa vastaava termoparijännite mitattuun jännitteeseen ja lukemalla taulukosta tätä jännitettä vastaava lämpötila. Nykyiset termo-

parin mittalaitteet on varustettu selkeällä näytöllä, josta lämpötila voidaan lukea automaattisesti.

### 3.4.2 Lämmönsiirtotapahtuma

Lämmönsiirtotapahtuma kuvaa tilannetta, jossa lämpö siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan, ja systeemin pyrkimyksenä on tavoittaa terminen tasapaino. Tässä työssä tarkastellaan kahdenlaista lämmönsiirtotapahtumaa, keittotapahtumaa ja jäähdystystapahtumaa, joissa tärkeimmät elementit ovat ympäröivä fluidi (vesi, höyry, ilma) ja kiinteä aine (peruna). Keittotapahtumassa lämpö määrän arvo on positiivinen, jäähdystystapahtumassa negatiivinen. Kappaleen sisällä kulkeva lämmön siirtyminen on johtumista. Nesteen tai kaasun ja kiinteän välillä olevan pintafilmin alueella lämpö siirtyy konvektiolla. Lämmön siirtymisessä tulee näin ollen ottaa huomioon sekä konvektio että johtuminen. (Hautala ja Peltonen 2009.) Lämpösäteilyä ei tässä työssä huomioida.

$$Q = -\lambda A \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$$

Kaava (2) Lämmön johtuminen

- 
- $\lambda$  = lämmönjohtavuus (W/mK)
  - $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$  = lämpötilagradientti
  - A = pinta-ala

Konvektiossa aineen lämmittämiseen tai jäähdyttämiseen tarvittava energiamäärä peruskaava on:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Kaava (3) Lämmön konvektio

- 
- Q = lämpömäärä, (J/s)
  - m = massa, kg
  - c = ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK
  - ( $\Delta T$ ) = lämpötilan muutos, loppulämpötila - alkulämpötila

Lämmön siirtymistä voidaan tarkastella sen mukaan, minkä suhteen lämpötila muuttuu:

- **Stationäärinen:** Kappaleen lämpötila ei muutu sen kummemmin ajan eikä paikan suhteen.
- **Tasalämpötila:** Kappaleen lämpötila muuttuu ajan kuluessa, mutta pysyy yhtenäisenä kappaleen sisällä, jolloin lämpötila voidaan nähdä ajan funktiona: Paljonko lämpöä aikayksikössä siirtyy jonkin pinnan läpi. (Fourierin I laki)
- **Epästationäärinen:** Kappaleen lämpötila muuttuu sekä ajan että paikan suhteen, jolloin kappaleen sisällä todetaan eri lämpötiloja lämmön siirtymisen edetessä. (Cengel ja Ghajar 2011.)

### Epästationäärinen lämmönsiirto

Epästationäärinen lämmönsiirto on puhdasta arkitodellisuutta kaikessa monimutkaisuudessaan, jolloin täytyy arvioida lämmönsiirtymiseen tarvittavaa aikaa ja energiaa erilaisissa kappaleissa, ja eri pisteissä kappaleen sisällä. Fourierin II laki kertoo, miten lämpötila muuttuu ajassa ja paikassa, kun tunnetaan lämpötila alussa, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti kussakin pisteessä. (Hautala ja Peltonen 2009.)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Kaava (4) Fourierin II laki

Fourierin II lain yhtälö on osittaisdifferentiaaliyhtälö. Ennen kuin kaavaa voidaan käyttää, tulee osittaisdifferentiaalit approksimoida, ja tähän on olemassa erilaisia vaihtoehtoja (Louhenkilpi 2009). Tämän ratkaiseminen johtaa kuitenkin loputtomiin sarjoihin ja yhtälöihin, jotka ovat työläitä ratkaista.

Yhtälön pohjalta on laadittu myös yksinkertaistettuina osakokonaisuuksina toteutettava ratkaisu, joka pohjautuu Fourierin sarjojen ohella kaavioihin ja taulukoihin, jolloin kohtuullisen lähellä oikeaa oleva ratkaisu voidaan saavuttaa interpoloimalla. M.P. Heisler kehitti jo 1940-luvulla kaaviot, joita käytetään edelleen hyväksi, ja joihin pohjautuvat myös nykyiset jatkosovellukset (Heisler 1947). Epästationäärisen lämmönsiirron sovelluksissa pyritään yksilutteisuuteen, joka mahdollistaa lämmönsiirron tarkastelun symmetrian pohjalta. Symmetrian mahdollistavia muotoja



ovat suora seinä, pitkä sylinterinmuotoinen kappale ja pallonmuotoinen kappale, joilla on sekä terminen että geometrinen symmetria. Näissä tapauksissa tarvitaan lämmönsiirron seurantaan vain yksi tilakoordinaatti. (Cengel ja Ghajar 2011, 230-234.) Tässä työssä keskitymme pallon muotoisen kappaleen lämmönsiirtoon, joka on symmetrinen keskipisteensä suhteen, ja jossa tapahtuvaa lämmönsiirtoa seurataan sen säteen matkalla.

Keittotapahtuman kuvaus epästationäärisen lämmönsiirtymisen kannalta voidaan esittää seuraavalla tavalla: Kun pallonmuotoinen kappale (=peruna) siirretään lämpötilaan  $T_\infty$  (=kiehuva vesi tai höyrytila), pallo itse on alkulämpötilassa  $T_i$ ,  $T_\infty > T_i$ . Pallon pinnan ja pintakerrosten lämpötila alkaa kuitenkin kasvaa, kun lämpö siirtyy ympäröivästä aineesta. Tästä pallon sisälle kehittyy lämpötilagradientti, jolloin alkaa lämmön johtuminen pallon pinnasta kohti sen keskipistettä. Lämpötila pallon keskellä on alkulämpötilassa  $T_i$  alkuaikapisteesä  $t_0$ . Aikapisteessä  $t_2$  lämpötila on muuttunut. Pallon keskipiste saavuttaa lopulta lämpötilan  $T_\infty$  aikapisteesä  $t_\infty$ . Tätä tilannetta kutsutaan lämpötasapainoksi, jolloin lämmön siirtyminen pysähtyy, koska lämpötilaeroa ei enää ole. (Cengel ja Ghajar 2011, 225.)

Dimensiottomuus on käyttökelpoinen menetelmä silloin, kun käsiteltävä kokonaisuus sisältää monia muuttujia. Sen avulla voidaan vähentää itsenäisten muuttujien määrää yksisuuntaisessa lämmönsiirtotapahtumassa. (Cengel ja Ghajar 2011, 230-234.) Epästationäärisen lämmönsiirron tärkeimmät dimensiottomat suureet ovat:

**Fourierin luku** kuvaa dimensiotonta aikaa. Se on läpi kulkevan lämmön suhde varastoituneeseen lämpöön. Mitä suurempi Fourierin luku on, sitä nopeammin lämpö etenee.

$$T = \frac{(\alpha * t)}{L^2}$$

Kaava (5) Fourierin luku

- 
- $\alpha$  = lämpötilan tasoittumiskerroin
  - $t$  = aika (s)
  - $L$  = karakteristinen mitta, esim. pallon säde  $r$ . (m)

**Biotin luku** kuvaa materiaalin sisäisen lämmönjohtumisvastuksen suhdetta ulkopinnan konvektion vastukseen. Biotin luvulla on tärkeä rooli sellaisissa lämmönsiirtotapahtumissa, joissa vaikuttaa pinnan konvektio. Jos Biotin luku on alle 0,1, sisäinen lämmönsiirtymisvastus on niin paljon ulkopinnan konvektion vastusta pienempi, että sisäistä lämmönsiirtymistä voidaan tulkita tasalämpötilamallilla. (Cengel ja Ghajar 2011.)

$$Bi = \frac{(h \cdot L)}{\lambda} \qquad \text{Kaava (6) Biotin luku}$$

- 
- $h$  = konvektion lämmönsiirtymiskerroin ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
  - $L$  = karakteristinen mitta, esim.  $r$  (m)
  - $\lambda$  = materiaalin lämmönjohtavuus ( $\text{W}/\text{mK}$ ), joskus merkitty myös  $k$ :lla

Biotin luku voidaan selvittää Fourierin luvun ja lämpötilagradientin perusteella joko Heislerin kaavion avulla tai hakemalla kertoimet taulukosta, jossa on Biotin luvun vakiot. (Cengel ja Ghajar 2011, 230-234.) Tällöin vakiot haetaan kyseisten tekijöiden paraabelin eksponentiaalisesta trendiviivasta.

**Konvektion lämmönsiirtokerroin.** Lämmönsiirtymistä laskettaessa täytyy aina ottaa huomioon myös rajapinnat. Konvektion lämmönsiirto kuvaa lämmön siirtymistä liikkuvan aineen mukana. Tässä tutkimuskohteessa kyse on tilanteesta, jossa lämpö siirtyy liikkuvasta aineesta, eli vedestä tai höyrystä rajapinnan läpi pyöreään kappaleeseen. Lämmönsiirtokertoimen  $h$  määrittämiseksi on olemassa suuri joukko eri tilanteisiin kehitettyjä ratkaisuja. (Hallström; Skjöldebrand ja Trägårdh 1988, 67.)

Konvektion lämmönsiirtokertoimen ( $h$ ) laskemiseen tarvitaan kolme eri lukua:

- Reynoldsin luku  $Re = \rho u d / \eta$
- Prandtin luku  $Pr = c_p \eta / \lambda$
- Nusseltin luku:  $Nu = h d / \lambda$
  
- $u$  = keskimääräinen nopeus m/s
- $\rho$  = tiheys,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $d$  = karakteristinen mitta, esim. halkaisija. (m)

- $\eta$  = kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )
- $\mu$  = dynaaminen viskositeetti
- $c_p$  = ominaislämpökapasiteetti ( $J/kgK$ )
- $\lambda$  = lämmönjohtavuus (fluidi)  $W/(mK)$
- $\alpha$  = lämmöntasointumiskeroin ( $m^2/s$ )

(Hallström; Skjöldebrand ja Trägårdh 1988, 40-41.)

Nusseltin luvun peruskaava sisältää konvektion lämmönsiirtokerroimen  $h$ . Tässä Whittakerin muokkaama kaava virtaukselle pallon yli, ja jonka avulla lämmönsiirtokerroin lopulta ratkeaa.

Kaava (7)

Nusseltin

luku

$$Nu_{pallo} = \frac{hD}{\lambda} = 2 + (0,4 \cdot Re^{1/2} + 0,06 \cdot Re^{1/2}) \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s}\right)^{1/4}$$

- 
- $\mu_{\infty}$  = Dynaaminen viskositeetti, ympäröivä fluidi
  - $\mu_s$  = Pintafilmin dynaaminen viskositeetti

(Cengel ja Ghajar 2011, 385)

Kaavan avulla laskettu Nusseltin luku voidaan sijoittaa alkuperäisestä Nusseltin luvun peruskaavasta muokattuun kaavaan, jolloin konvektion lämmönsiirtokerroin saadaan selville

$$h = Nu \cdot \left(\frac{\lambda}{d}\right)$$

Kaava (8) Konvektion lämmönsiirtokerroin

---

Lämmönsiirtokerroimen ratkaiseminen on osa kokonaisuutta, joka on täysin sidoksissa kyseiseen lämmönsiirtotapahtumaan. Näin ollen, yhdenkin tekijän muutos vaikuttaa kertoimen suuruuteen.

### 3.4.3 Kypsennystavat

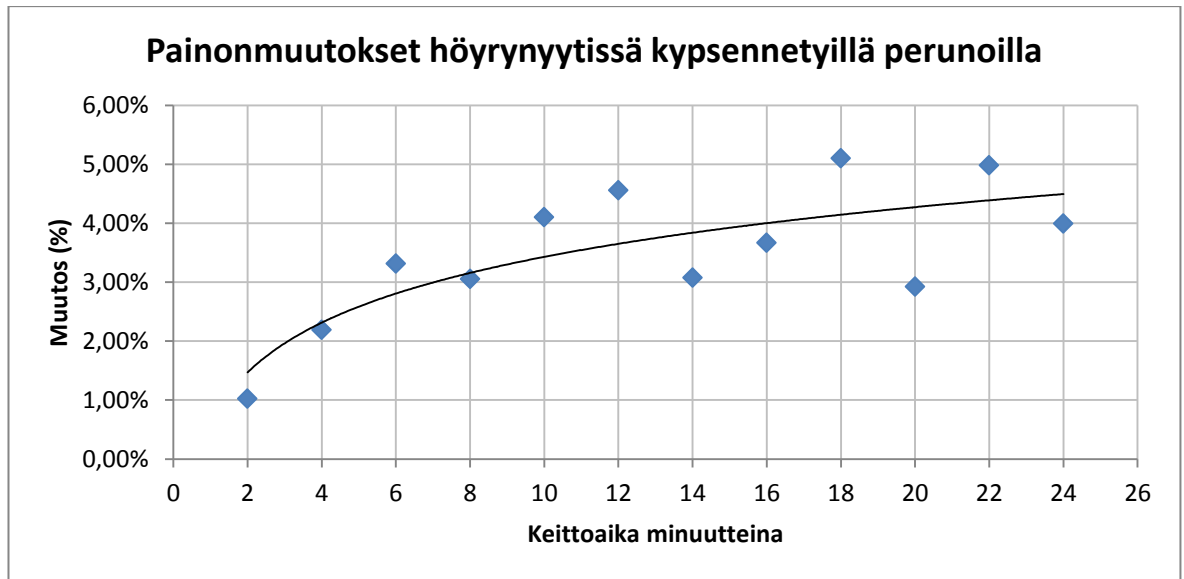
**Kypsentäminen vedessä ja höyryssä.** Keittäminen on yksi yleisimmistä ja tärkeimmistä kypsentämistavoista. Perinteisessä vesikeitossa vesi toimii lämmön

siirtymisen väliaineena kappaleen pinnalta sen sisäosiin. Vesikeitossa kypsennettävä ruoka-aine on vapaasti veden alla, ja vesikerroksen läpi kulkevat poreet saattavat erityisesti pienet vedessä uivat kappaleet liikkeelle. Höyrykeitossa kattilan pohjalla kiehuu vesi, ja kypsennettävä kohde asetetaan höyryn yläpuolella olevaan siivilämäiseen koriin, jolloin se on turvassa kiehumisen turbulenssilta. Normaalisissa ilmanpaineissa vesi kiehuu noin 100 °C lämpötilassa, ja höyrystyminen voimistuu merkittävästi. Höyryn lämpötila pysyy normaaliolosuhteissa samana, noin 100 °C. (Engineering Toolbox 2012)

Höyry- ja vesikeitossa tärkeinä vaikuttavina tekijöinä ovat veden kovuuden ja pH:n erot. Aihetta on käsitelty kappaleessa 2.2.3. Vesikeitossa perunat ovat alttiina veden turbulenssille, ja kuuma hieman emäksinen vesi liuottaa pektiiniä ja kalsiumia soluseinistä, kun taas pH-arvoltaan lievästi happamassa höyrykeitossa liukeneminen on vähäisempää. Tämän vuoksi vesikeitto pehmentää perunan nopeammin ja tehokkaammin. (McGee 2004, 285-286.) Vedellä on korkea ominaislämpökapasiteetti, 4,219 kJ/Kg °C (100 °C lämpötilassa), mikä edistää lämmön nopeaa siirtymistä. Höyryn ominaislämpökapasiteetti on 1,890 kJ/Kg °C (100 °C). (Engineering Toolbox 2012). Kun vesikeittoon siirrettävä kohde on kylmempi kuin sitä ympäröivä vesi, kappaleen ja veden välille ei synny eristävää höyrykerrosta, vaan ympäröivä vesi pääsee suoraan kontaktiin kappaleen pinnan kanssa (Winterthorn 2011).

**Kypsennys höyrynyytissä** on uudenlainen tapa tehdä ruokaa. Ruoanlaittopaperin sisällä peruna on suojassa veden ja höyryn suoralta vaikutukselta vain lämmön siirtyessä rajapintojen läpi: Konvektio perunan pinnassa ei ole itsestäänselvyys. Ruoanlaittopaperin sisällä peruna kypsyy omassa suljetussa ympäristössään siitä liuenneessa nesteessä, jonka pH-arvo on sama kuin perunalla itsellään, sekä nesteen höyrystyneessä muodossa. (kappale 2.2.3, Kuvio 4)

Peruna menettää keitossa aina osan painostaan haihduttamalla. Tämän voi todeta sekä punnitsemalla peruna ennen ja jälkeen keiton. Kun perunaa kypsennetään höyrynyytissä, sen sisällä keitosta poiston jälkeen havaittu neste on peräisin perunasta. Painonmuutoksista on esimerkkikuvaaja nytytissä keitetylle perunalle (Kuvio 8). Painon muutoksiin vaikuttaa paljon myös voimakas haihtuminen keiton jälkeen, eli taulukon tietoja ei voi soveltaa pelkästään keiton vaikutuksiin.



Kuvio 8: Höyrynytytti: Painon muutokset kypsennyksen ja haihtumisen vaikutuksesta.

Kevenemisen vuoksi pienet perunat lopulta kelluvat vesikeitossa, koska niiden tiheys on keiton loppuvaiheessa pienempi kuin veden.

### Vaikuttavat virtaukset ja turbulenssi

Normaalisti perunat keitetään vedessä siten, että kattila on ensin täynnä perunoita, ja tähän lisätään vesi. Vesi ei kattilassa virtaa, mutta nousevat höyrykuplat saattavat veden liikkeeseen.

Tässä työssä on kyse virtauksesta pallonmuotoisen kappaleen yli. Virtauksen luonne on tässä tapauksessa vahvasti riippuvainen vastuskertoimesta  $C_D$ , jossa sekä kitkavastus että painevastus voivat olla olennaisia tekijöitä. Reynoldsin luvun ollessa alhainen,  $<10$ , kitkavastuksen merkitys vastuskertoimessa on suurempi, kun taas Reynoldsin luvun ylittäessä 5000, on painevastuksen merkitys suurempi. (Cengel ja Ghajar 2011, 381.)

Täydessä kiehuunassa poreiden liike on turbulenttista. Tutkimustilanteessa peruna on stabiloitu veden sisään ohuen verkon varaan, jolloin tutkimustilanteessa olevan perunan voidaan katsoa olevan vastaavassa hallitussa positiossa kuin jos kattila olisi täynnä perunoita.

Reynoldsin luku kuvaa nestekerrosten kiihdyttämiseen liittyvien hitausvoimien suhdetta kitkavoimiin. Dimensioton Reynoldsin luku lasketaan kaavalla:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_s}{\eta} = \frac{v \cdot D_s}{\nu}$$

Kaava (9) Reynoldsin luku

- 
- $\rho$  = tiheys
  - $v$  = virtausnopeus
  - $D_s$  = karakteristinen pituus, tässä tapauksessa pallon (sphere) halkaisija
  - $\eta$  = dynaaminen viskositeetti
  - $\nu$  = kinemaattinen viskositeetti ( $\nu = \eta / \rho$ )

(Hallström; Skjöldebrand ja Trägårdh 1988, 40.)

Jos Reynoldsin luku on alle 10, pallon muotoinen kappale ei jaa virtavanaa, vaan virta kulkee sen pintaa pitkin (Cengel ja Ghajar 2011, 381). Laminaarin virtauksen maksimiraja on kuitenkin  $Re < 2100$ . Kiehuvan veden virtausnopeutta on hankala määrittellä, jolloin lopputulokseen täytyy ottaa huomioon virtausnopeuden mahdollinen vaihteluväli.

Höyryn virtausnopeus perunan pinnan ohi voidaan arvioida höyrystyvän veden määrän ja höyrytilan suhteena. Ajatellaan, että peruna on verkon varassa suorareunaisen kattilan keskellä muutaman sentin päässä kiehuvan veden pinnasta. Jos litra vettä haihtuu kattilasta kiehattamalla 24 minuutissa, josta syntyy 1,7 kuutiota höyryä, tarkoittaa se sitä, että kattilasta poistuu höyryä  $0,0012 \text{ m}^3$  sekunnissa. Oletettu höyryn virtausnopeus ulos kattilasta saadaan jakamalla tuo määrä kattilan ympärysmittan pinta-alalla. Näin ollen, höyryn virtausnopeus olisi noin 3 senttiä sekunnissa.

#### 3.4.4 Perunan lämpöopilliset ominaisuudet

Ruoka-aineiden lämpökäsittelyssä raaka-aineen ominaisuuksilla on tärkeä rooli. Ensimmäinen ongelma on, että nämä materiaalit ovat normaalisti epähomogeenisiä. Toinen ongelma on, että raaka-aineiden ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi esimerkiksi erilaisen alkuperän tai edellisen käsittelyn vuoksi. Sitä paitsi, muutoksia tapahtuu yleensä myös kuumentamisen ja jäähtymisen aikana. Näin ollen, elintarvikeprosessien suunnitteluteorioiden ja laskelmien pääongelmia ovat

muuttuvat fysikaaliset ominaisuudet. (Hallström;Skjöldebrand ja Trägårdh 1988, v-vi). Normaalisti ei ole riittävästi tietoa, jotta olisi mahdollista kuvata niitä laadullisesti ja määrällisesti riittävän hyvin.

Lämmönsiirron aikana lämpötila kappaleen sisällä muuttuu yleensä pisteestä toiseen ja ajan myötä. Lämpötilan muutosta voidaan tarkastella ajan ja paikan suhteen yhdensuuntaisena, kun on kyse tasaisesta pinnasta, pitkistä sylintereistä ja



palloista. Koska perunan muoto lähentelee pyöreää, on tässä työssä lämmön siirtymisen seuraamiseen käytetty pallon muotoista perunaa. Pallolla on sekä terminen että geometrinen symmetria: Pallo on symmetrinen sen keskipisteen suhteen ( $r=0$ ). (Cengel ja Ghajar 2011, 224.)

Lämpöominaisuuksia tarkasteltaessa on raaka-aineesta selvitettävä seuraavia asioita:

- tiheys  $\rho$
- ominaislämpökapasiteetti  $c_p$
- lämmönjohtavuus  $\lambda$
- lämpötilan tasoittumiskerroin (terminen diffuusio)  $\alpha$
- olomuodon muutostekijät (faasinmuutos)

### Ominaislämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti tarkoittaa tarvittavan lämmön määrää lämmittämään kilo materiaalia yhden asteen  $1\text{ }^\circ\text{C}$  verran. Ominaislämpökapasiteetin arvo muuttuu lämpöolosuhteiden mukaan, joten jos arvo poimitaan taulukosta, tarvitaan ominaislämpöarvon lisäksi tieto lämpöolosuhteista. Se lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot (t_1 - t_2)}$$

Kaava (10) Ominaislämpökapasiteetti

- 
- $c_p$  = raaka-aineen ominaislämpö vakiopaineessa ( $\text{Jkg}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )

- $Q$  = saavutettu (tai menetetty) lämpömäärä (J)
- $m$  = massa (kg)
- $(t_1-t_2)$  = lämpötilaero ( $^{\circ}\text{C}$ )

(Fellows 2009, 339.)

Hallströmin ja Fellowsin teoksien mukaan raaka-aineen ominaislämpökapasiteetti voidaan laskea sen komponenttien ominaislämmön ja ainesuhteiden perusteella. Fellowsin mukaan perunan ominaislämpö on huoneenlämmössä  $3,48 \text{ kJkg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  (Fellows 2009) (Hallström;Skjöldebrand ja Trägårdh 1988). Koska perunan pääkomponentit ovat noin 76 % vettä ja noin 15 % hiilihydraattia, voidaan todeta, että veden ominaislämpö on  $4,18 \text{ kJkg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  ( $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ja hiilihydraatin  $1,547 \text{ kJkg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , jolloin arvio perunalle on johdonmukainen. Ominaislämpökapasiteetti riippuu koostumuksesta, erityisesti kosteussisällöstä. Taulukossa 12 on esimerkkilaskelma aineosien ja niille annettujen ominaislämpöarvojen perusteella:

Taulukko 2: Ominaislämpökapasiteetti komponenteista

Perunan pääkomponentit	Aineosuus	cp	
Vesi	76 %	4,18	3,1768
Rasva	1 %	1,928	0,01928
hiilihydraatti	16 %	1,547	0,24752
Tuhka	5 %	0,908	0,0454
Proteiini	2 %	1,711	0,03422
<b>Ominaislämpö <math>\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}</math>:-</b>			<b>3,52322</b>

Jäätäneelle perunalle kirjallisuudessa annettu ominaislämpökapasiteetti on  $1,80 \text{ kJkg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , ja jälle arvo on  $2,04 \text{ kJkg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , mistä voidaan johtaa kosteuspitouuden suuri merkitys. (Fellows 2009, 340.)

### Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus on mitta sille, miten hyvin materiaali johtaa lämpöä. Se tarkoittaa lämmön määrää, joka johtuu tietyn matkan materiaalin läpi sekunnissa vakio- lämpötilaerojen vallitessa. Lämmönjohtavuus lasketaan seuraavan kaavan pohjalta:



$$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta T}$$

Kaava (11) Lämmönjohtavuus

- 
- $\lambda$  = Lämmönjohtavuus W/(m\*K)
  - $q$  = lämpövirrantiheys ( $q = \varphi/A$ )
  - $\varphi$  = Lämpövirta
  - $A$  = pinta-ala
  - $d$  = matka

Kun tunnetaan kyseinen lämmönsiirtotapahtuma, voidaan siihen liittyvä lämmönjohtavuus laskea mitattujen tietojen pohjalta. Tämä vaatii tapahtuman osatekijöiden kokonaisvaltaista nivomista yhteen, jolloin lämmönsiirrosta selvitetään Biotin luku, ratkaistaan konvektion lämmönsiirtokerroin ja näiden avulla lopulta selviää lämmönjohtavuus.

$$\lambda = \frac{(h \cdot r)}{Bi}$$

Kaava (12) Lämmönjohtavuus Biotin luvun ja lämmönsiirtokertoimen avulla

---

Lämmönjohtavuuteen vaikuttavat erilaiset tekijät, jotka liittyvät ruoka-aineen ominaisuuksiin. Näitä ovat esimerkiksi solurakenne, solujen väleihin jääneen ilman määrä ja kosteuspitoisuus, sekä ympäristön lämpötila ja paine. Alla on kaava, jonka avulla voi ennustaa lämmönjohtavuutta koostumuksen perusteella:

$$\lambda = \lambda_w \cdot X_w + \lambda_s \cdot (1 - X_w)$$

Kaava (13) Lämmönjohtavuus /koostumus

- 
- $\lambda_w$  (W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>) = veden lämmönjohtavuus
  - $X_w$  = veden aineosuus
  - $\lambda_s$  = kiinteiden aineosien lämmönjohtavuus (oletettu 0,259 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>)

Tämän pohjalta voidaan arvioida perunan lämmönjohtavuudeksi edellisen taulukon tietojen perusteella 0,5 W/m°C., mikä on lähellä Fellowsin taulukkoarvoa 0,55 W/m°C (Fellows 2009, 342). Kosteuspitoisuuden aleneminen aiheuttaa lämmönjohtavuuden olennaisen alenemisen.

## Diffuusiokerroin /lämpötilan tasoittumiskerroin

Lämpötilan tasoittumiskerroin mittaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä suhteessa sen kykyyn varastoida lämpöä. Se on suhdeluku, joka sisältää lämmönjohtavuuden, tiheyden ja ominaislämmön, ja se lasketaan kaavalla:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Kaava (14) Lämpötilan tasoittumiskerroin

- 
- $\alpha$  ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) = lämpötilan tasoittumiskerroin (=diffuusiokerroin)
  - $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) = tiheys
  - $\lambda$  ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) = Lämmönjohtavuus

Lämpötilan tasoittumiskerrointa käytetään laskettaessa ajan ja lämpötilan vaikutussuhdetta kuumennettavissa materiaaleissa. Myös lämpötilan tasoittumiskertoimeen vaikuttaa suuresti juuri kosteuspitoisuus. Lämpötilan tasoittumiskerroin on kaikille kaasuille keskenään jokseenkin sama. Sama pätee myös nesteille keskenään ja kiinteille aineille.

- $\alpha$  Kaasuille  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- $\alpha$  Nesteille  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- $\alpha$  Kiinteille aineille  $10^{-4} - 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . (Hautala ja Peltonen 2009, 180.)

Perunan lämpötilan tasoittumiskerroin on Fellowsin mukaan  $1,70 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Esi-merkkiperunan aineosien perusteella laskettuna tulokseksi saadaan hieman pienempi luku.

Taulukko 3: Diffuusiokerroin/koostumus

	Aineosuus	$\alpha$	$\alpha$ * %	Diffuusiokerroin
<b>Vesi</b>	76 %	0,000000146	1,1096E-07	
<b>Rasva</b>	1 %	0,0000001	1,0000E-09	
<b>hiilihydraatti</b>	16 %	0,000000082	1,3120E-08	
<b>Proteiini</b>	2 %	0,000000075	1,5000E-09	
			1,2658E-07	$1,27 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

## Faasinmuutokset perunassa

Kypsymisen aikana perunassa tapahtuu olomuodon muutoksia, joista ainakin kaksi voidaan tunnistaa. Tärkkelyksen gelatinoituminen on yksi faasinmuutos, jossa kiinteä tärkkelysjyvänen muuttuu geelimäiseksi massaksi. Toinen faasinmuutos on perunan sisällä olevan veden höyrystyminen. Höyrystyminen tarkoittaa nestemäisen aineen muuttumista kaasumuotoon. Höyrystyminen ja gelatinoituminen ovat molemmat endotermisiä eli lämpöä sitova prosesseja, koska tarvitaan lisää energiaa jotta molekyylien keskinäinen koossapitävä voima purkautuu tai muu vuorovaikutus muuttuu. (Douzals; Marechal ja Gervais 1996) (Antila, ym. 2009, 112). Faasinmuutokseen tarvittavaa energiaa kutsutaan latenttilämmöksi.

Vakiopaineessa faasinmuutos tapahtuu yleensä siten, että tuotaessa energiaa aineeseen kasvava määrä aineesta siirtyy toiseen faasiin vakioämpötilassa, kunnes kaikki aine on uudessa faasissa. Vasta tämän jälkeen lisäenergian tuominen aineeseen alkaa jälleen nostaa lämpötilaa. (Lappeenranta University 2010.) Lämpömittauksissa faasinmuutos näkyy siis lämmön nousunopeuden väliaikaisena hidastumisena. Nousunopeutta seurataan aikapisteen ja edellisen aikapisteen lämpötilan erotuksen avulla. Normaalisissa lämmön etenemisvauhdissa kohti tasapainotilaa lämmön nousu hidastuu tasaisesti, eli erotusten arvo pienenee. Selkeimmissä faasinmuutostilanteissa erotus on lähellä nollaa. Faasinmuutoksen jälkeen paluu lämmön nousun normaalivauhtiin näkyy muutosarvon nousuna.

## 4 KYPYSYMISEN KUVAUKSEN TUTKIMUKSET

Tässä työssä perunan kypsyamisprosessin kuvaamiseen on kehitetty kolmea eri menetelmää, jotka toimivat perunan kypsyyden mittareina toisiaan täydentäen. Näistä etenkin lämmönsiirto ei yksinään toimi kypsyyden mittarina, mutta se on tärkeä työkalu kypsyamisprosessin määrittämisessä. Lämmön siirtymisestä saatu tieto on kypsymisen kuvausmenetelmän lähtökohta.

Rakennemittaukset voivat toimia kypsyyden itsenäisinä mittareina, mutta kun siitä saatu tieto yhdistetään lämpötietoon, voidaan prosessista jo tehdä johtopäätöksiä. Kun tähän lisätään mikroskopointi, solutason analyysit mahdollistavat seurannan myös teoreettisen tiedon pohjalta. Näiden kolmen tiedon yhdistelmä on siis perin kattava analyysi perunan kypsymisestä.

Seuraavissa kappaleissa kuvataan kypsymisen kuvausmenetelmän kehittämisessä tehtyjä analyysejä kolmelle eri kypsennystavalle: Vesikeitolle, höyrykeitolle ja höyrykeitolle ruuanlaittopaperinyytissä. Tästä kolmannelta keittotavasta käytetään jatkossa nimitystä nyyttikeitto, ja nyytistä käytetään myös nimitystä höyrynyytti.

### 4.1 Lämmön siirtymisen tutkimukset

Lämmön siirtymisen mittaukset tehtiin kesän 2011 lopulla, jolloin tutkimusmateriaalina oli vuoden 2010 sadon Melody-peruna. Peruna oli hankittu tukkuliikkeen kautta, ja sen laatu oli edellisen vuoden sadosta huolimatta hyvä. Lämmönsiirron mittauksia varten hankittiin koko tarvittava määrä perunoita kerralla, ja mittaukset aikataulutettiin viikon sisälle.

#### 4.1.1 Menettelytavat

##### Perunoiden esikäsittely

Karbokuoritut perunat sorvattiin koneellisesti vakiokokoon noin 28–30 grammaa painaviksi ja pyöreiksi, halkaisijaltaan noin 35 mm:n kokoisiksi. Nämä säilöttiin sitruunahappo-askorbiinihappoliuokseen (0,8 % sitruunahappoa ja 0,3 % askorbiinihappoa) ja säilytettiin jäähdytettynä jääkaapissa. Tämä säilöntäkoostumus oli Al-

ma-hankkeen testeissä osoittautunut parhaimmaksi. (Viikki Food Centre 2007, 50.)

Kypsennystä varten tarvittava erä otettiin edellisenä iltana viileään huoneenlämpöön, (n. 20 °C). Koko ajan käytettiin vesiastiaa ja edellä mainittua säilytysliuosta, jossa perunoiden lämpötilaa voitiin seurata lämpömittarin avulla. Kuvaushuone oli säilytystilasta erillinen tila, jonka lämpötila saattoi nousta keittojen ja auringonvalon vaikutuksesta. Lämpökuvausta varten otettiin kuvaushuoneeseen kerrallaan vain osa perunoista. Höyry- ja vesikeittoa varten perunat odottivat keittoa vesiastiassa. Höyrynyytti (katso Kuvio 9) paketoitiin kuvauspäivänä 20 °C:n tasalämpöisessä tilassa. Termopari kiinnitettiin perunan keskelle sähköteipin ja langan avulla.



Kuvio 9: Höyrynyytti (Saga Ruoanlaittopaperi)

### **Keittomenettelyjen pelkistäminen**

Keittomenettelyt suunniteltiin siten, että ylimääräiset lämpötilaan vaikuttavat tekijät karsiutuisivat pois. Perunat keitettiin normaalissa teräskattilassa perinteisellä keittoliedellä. Keitoissa käytettiin suurehkoa 5 litran kattilaa, jotta perunoiden lisääminen ei vaikuttaisi liikaa keitto-olosuhteisiin, vaan lämpötila olisi heti perunoiden lisäämisen jälkeen lähellä 100:aa °C astetta. 20 °C:n lämpötilaan temperoidut perunat siirrettiin keittoon kun vesi kiehui, jolloin keittoaikaa mittaava ajastin käynnistettiin. Myös metallipinnan kosketus katsottiin ylimääräiseksi vaikuttavaksi tekijäksi, ja tämä vältettiin käyttämällä kattilan reunaan pingotettua mitoitettua verkkopussia, jossa perunat pysyivät sopivalla korkeudella. Sekä höyrykeittoa että vesikeittoa varten oli oma mitoitettu verkkopussinsa, jotta perunat pysyivät joko veden sisällä tai veden yläpuolella. Perunan halkaisua varten varattu veitsi ja keitosta

poimiva kauha pidettiin lämpöisenä liedellä pidettävässä kattilassa, jotta kylmä veitsi ei jäähdyttäisi halkaisupintaa.

### Lämpökuvausmenettely

Lämpökuvaussessiot jaksotettiin siten, että kokonaisuudessaan 20 minuutin keitosta otettiin lämpökuvat kahden minuutin välein. Toistoja tehtiin viisi jokaiselle aikapisteelle. Toistomäärä valittiin erityisesti sen vuoksi, että lämpökuvaus oli haastava työvaihe.

Lämpökuvauksien olosuhteet pyrittiin vakioimaan mahdollisimman hyvin, esimerkiksi vähentämällä ylimääräisiä valaistuslähteitä. Huoneen lämpötila kirjattiin ylös, ja kaikki kuvaussessiot tallennettiin videolle. Yhdessä kuvaussessiossa oli aina 3-4 kuvattavaa perunaa, joista jokaisella oli oma keittoaikansa. Lisäksi jokaisessa keitossa oli mukana yksi erillinen peruna, jonka keskikohtaan oli kiinnitetty termopari. Toinen lämpömittari mittasi joko veden tai höyryn lämpötilaa, keittotavasta riippuen. Videolta pystyi jälkeinpäin seuraamaan kuvausviivettä, mittarien arvoja ja mahdollisia virheitä.



Kuvio 10: Perunan halkaisu lämpökuvauksen tiimellyksessä.

Lämpökuvan ottaminen tuli tapahtua mahdollisimman nopeasti, jotta peruna ei ehtisi jäähtyä. Tarkoitus oli, että peruna otettaisiin keitosta nopeasti, halkaistaisiin ja kuvattaisiin välittömästi. Kuvausalustana käytettiin eristemateriaalista sovitettua alustaa, jossa oli mitoitetut paikat perunan puoliskoille (Kuvio 10) Kuvausalustan tarkoituksena oli, että halkaistun perunan puoliskot putoaisivat koloihinsa, ollen välittömästi kuvausvalmiita. Käytännössä tämä olisi vaatinut lisää kehittelyä toimi-

akseen. Kuvausalue, pöytä ja kamera kiinnitettiin ja tuettiin paikoilleen kuvauksen ajaksi, jotta kaikilla kuvauksilla pysyisi samat asetukset.

Lämpökameraan tehtiin alkuasetukset, emissiivisyysarvo noin 0,90, ja lämpötila-alue 19–106 °C. Etäisyys kameran linssistä määritettiin kameran asetuksissa 40 cm:n mittaiseksi, mutta todellinen mitta osoittautui 37 sentiksi. Lämpökuvan lisäksi otettiin jokaisesta halkaistusta perunasta myös digikuva. Digikuvat osoittautuivat myöhemmin epätarkaksi ilmeisesti juuri kameran etäisyysasetuksen virheen vuoksi. Lämpökuvan tarkkuuteen tällä ei ollut vaikutusta.

### **Punnitukset, muistiinpanot ja videotalliot**

Jokainen kuvattu peruna rekisteröityi muistiinpanoihin lämpökuvien numerolla. Ennen keittoa jokainen peruna punnittiin ja tiedot kirjattiin muistiinpanoihin. Lämpökuvauksen jälkeen peruna punnittiin jälleen. Muistiinpanoihin kirjattiin lisäksi termoparin ilmoittama alkulämpötila, huoneen lämpötila ja keiton aikana huomatu poikkeamat.

Pyrkimys oli siihen, että punnitut perunat voitaisiin yksilöidä, jolloin keiton yhteydessä tapahtuvasta painon muutoksesta saataisiin tarkempaa tietoa. Jokaisessa keittoerässä oli kuitenkin 3–4 perunaa, jolloin vesi- ja höyrykeitossa testatut merkintätavat kuitenkin epäonnistuivat joko hankaluutensa ja kuvauksen hidastumisen takia tai merkinnät eivät pysyneet. Siten yksilöidyt punnitustiedot ennen keittoa jäivät näistä keitoista saamatta. Nyyttikeitoista sen sijaan yksilöidyt punnitustiedot pystyttiin saamaan talteen (Kuvio 8: Höyrynyytti: Painon muutokset kypsennyksen ja haihtumisen vaikutuksesta.) Lopulliset punnitustiedot höyry- ja vesikeitettyjen perunoiden painonmuutoksista ovat siten pääsääntöisesti keskiarvoja kustakin keittoerästä.

Videolta poimittiin jälkeinpäin termoparin lämpötilat kullekin lämpökuvauksen hetkelle, sekä kuvausviiveet ja poikkeamat. Termoparin mittaamia lämpötiloja pystyi poimimaan videoilta missä aikajaksoissa tahansa, mistä olikin selkeästi hyötyä aina kun tuli tarkistaa mittaustietoja.

## **Muut lämmönsiirtymisen mittaukset**

Perunan lämmönsiirtymisen ominaisuuksien täydennykseksi tehtiin myös täyskypsän perunan jäähdytysten mittauksia lämpökameralla, sekä ominaisuuksien vertailumittaukset raa'alle ja kypsälle perunalle temperoituna 55 °C:een. Tämä lämpötila valittiin, koska se oli hieman alle gelatinoitumisen alkamisen rajan, jolloin raa'an perunan ominaisuudet säilyivät suurimmaksi osaksi muuttumattomana.

**Täyskypsän perunan jäähdytysten seurannat.** Jäähdytystä varten perunat kypsennettiin ensin maksimilämpötilaan niin, että termoparin mittaama lämpötila stabiloitui. Jäähdytymisen eteneminen kuvattiin harvemmalla aikavälityksellä (3min) kuin kuumentamisen eteneminen, koska jäähtyminen huoneenlämmössä on huomattavasti hitaampaa.

Jäähdytymisen kuvaukset aloitettiin siten, että stabiloituneesta erästä nostettiin ensin yksi peruna kuvaukseen 0-jäähdytysaikaa varten. Tämän valmistuttua koko erä nostettiin keitosta, ja käynnistettiin jäähdytyksen ajastin. Perunat asetettiin jäähtymään ilmavalle alustalle etäälle toisistaan siten, että ilma pääsi kiertämään joka puolella. Perunat kuvattiin yksitellen halkaistusta perunasta 3 minuutin välein samaan tapaan kuin kypsennyksen lämpökuvaukset. Jäähdytystä seurattiin myös termoparin avulla.

Huoneilmassa suoraan keitosta poistettu peruna kutistui jäähtyessään huomattavasti, joten yhden lisämuuttujan mukaantulon takia saadut mittaustiedot eivät ole vertailukelpoisia muutoin kuin kyseisten jäähdytysten kesken. Näin ollen tämä mittaustiedot on jätetty odottamaan myöhempää tarvetta.

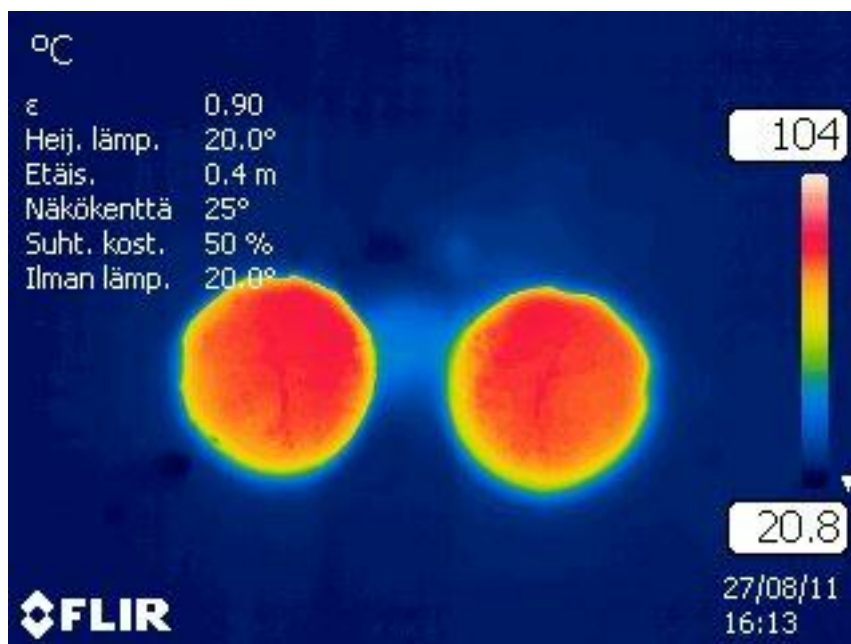
**Raa'an ja kypsän perunan vertailu.** Lämpökuvausten lisäksi tehtiin vielä vertailu raa'an ja kypsän perunan lämmönjohtavuudelle. Mittaukset toteutettiin pelkästään termoparimittauksin. Erä perunoita keitettiin täysin kypsäksi, ja jäähdytettiin huoneenlämpöön vesiastiassa. Lämpöhaude säädettiin 55 °C:een. Lämpöhauteeseen asetettiin yksi peruna kerrallaan termopari sidottuna keskelle. Näistä kirjattiin minuutti minuutilta lämmön eteneminen siihen saakka, että peruna oli temperoitunut 55 °C:een. Vastaava prosessi tehtiin erälle raakaa perunaa. Temperoitujen perunoiden jäähtyminen huoneenlämpöön taltioitiin, ja rinnakkaismäärittämiä tehtiin 3 per laatu.



## 4.1.2 Lämmönsiirron analyysit

### Lämpökuvien analysoiminen

Lämpökuvien tiedoista oli tavoitteena koota lämmön etenemisdataa perunan reunaan kohti sen keskustaa. Lämpökuvat otettiin Flir T360 -lämpökameralla. Lämpökuva on kooltaan 320x240 pikseliä, ja jokainen pikseli sisältää yhden lämpötilan arvon. Etäisyydellä 37 senttiä kuvauspinnasta yhden pikselin läpimitaksi tuli noin 0,5 mm. Eli yhden millin matkalta saadaan jo kaksi lämpötila-arvoa. Kameran spektrialue on 7,5–13  $\mu\text{m}$ . Kameran tarkkuus on  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  tai  $\pm 2\%$  lukemasta, mutta systemaattinen virhe on johdonmukaisesti sama. Kameran terminen herkkyys eli kyky erottaa eri lämpötiloja on  $< 0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kun lämpötila on  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Flir Systems 2007.)



Kuvio 11: Lämpökuva 14 minuuttia höyryssä keitetystä perunasta

**Lämpödatan lähtötiedot.** Koska kuva-aineistoa oli kohtuullisen paljon, pyrittiin hakemaan mahdollisimman kätevää menetelmää lämpösuoran otantaan. Lämpökuva otettiin aina mahdollisimman pian keitosta noston jälkeen halkaistusta perunasta. Tässä yhteydessä peruna höyrystyi voimakkaasti, ja siitä myös siirtyi lämpöä kuvausalueeltaan. Perunan ja sen ympäristön lämpötiloissa ei lämpökuvissa ollut havaittavissa täysin tarkkaa rajaa, vaan rajat olivat vaihtelevasti liukuvia. Näin ol-

len lämpötilatietojen poimiminen ei ollut yksiselitteinen tehtävä, ja sitä täytyi lähteä haarukoimaan seuraavien tietojen pohjalta:

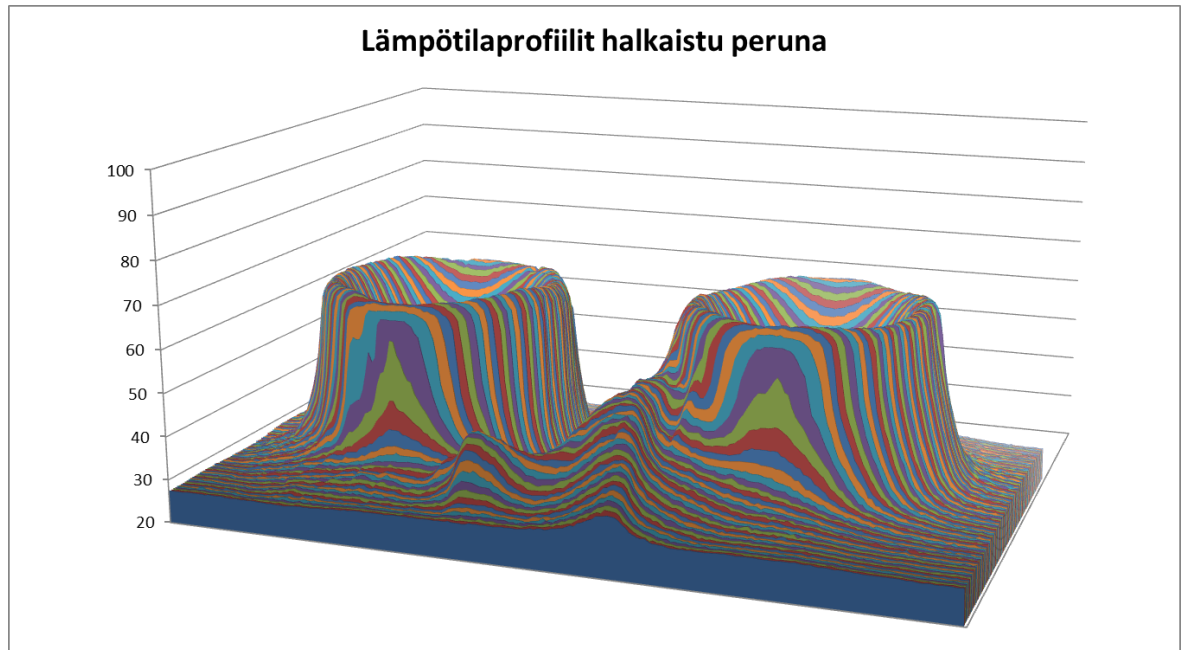
- **perunan koko:** Perunan halkaisija vaihteli 34 – 39 mm:n välillä, jolloin minimi- ja maksimipikselimäärä halkaisijasuoralle on 68 – 79 pikselin välillä. Kesiarvoinen perunan halkaisija oli 37 mm.
- **havaittava lämpötilaero vierekkäisten pikseleiden välillä:** Kun lähestytään oletettua reunarajaa, lämpötilaeroissa voidaan havaita reiluja eroja kahden yksittäisen pikselin välillä.
- **visuaalinen väriero:** Lämpökuvassa voidaan havaita perunan reunat kohtuullisen selkeästi, jonka perusteella voidaan ottaa valinta suoraan lämpökuvasta perunan reunasta reunaan.

### Otannan suorittamisen vaihtoehtoja

**Lämpökuvien identtisyys ja vakioitu keskikohta.** Vaihtoehto 1, eli mittauksen lähtöpisteenä perunan keskikohta oli ajateltu lähinnä käsittelyn nopeuttamiseksi. Aineistona käytettiin kokonaista lämpökuvaa, jonka datasta tehtiin kaavat valmiiksi Excel-pohjaan. Oletuksena oli, että lämpökuvat ovat keskenään identtisiä, jolloin yhdelle kuvalle tehdyt asetukset voitaisiin käyttää suoraan kaikkien kuvien dataan. Kätevyydestä huolimatta tämä ei osoittautunut hyväksi ratkaisuksi, koska perunoiden koko ja muoto vaihteli. Kuvauspöytä ei myöskään ollut pultattuna lattiaan, jolloin pieniä positiomuutoksia ilmeni ajoittain. Perunoissa oli jonkin verran soikeutta ja halkaisijamitat vaihtelivat, jolloin lämpötilatiedot oletetusta reunasta eivät olisi olleet todellisia reunasta lähteviä lämpötilatietoja.

**Lämpösuora kuvan diagonaalilta lämpötilaeron perusteella.** Vaihtoehtoa 2, lämpösuoraa kuvan reunasta reunaan testattiin siten, että otetun lämpösuoran vierekkäisien pikseleiden lämpötiloja verrattiin keskenään. Oletuksena oli, että suurimmat lämpötilaeropiikit ilmaisisivat perunan reunakohdan. Menettely todettiin mahdolliseksi, mutta osoittautui kuitenkin työlääksi, koska eri keittoaikojen vaikutukset lämpötilaerojen erottuvuuteen ja suuruuteen vaihtelivat runsaasti: Yksittäisen kuvan tietojen otantaan olisi mennyt kohtuuttoman paljon aikaa. Kuvio 12 havainnollistaa lämpötilaerojen asteittaista siirtymää perunan reunan ja sen ulkopuolella olevan alueen välillä. Kuviossa näkyvät hahmot perustuvat pelkkiin lämpötila-

arvoihin. Lämpötilatiedoista muodostuvalla perunahahmolla on pyöreät reunat, eli perunan reuna on pelkän lämpötilaeron perusteella haastavaa havaita yksiselitteisesti.



Kuvio 12. Lämpökuvan lämpötilatietojen perusteella tehty kaaviokuva 2 minuuttia keitetystä halkaistusta perunasta.

**Lämpösuora suoraan kuvasta visuaalisen värieron perusteella.** Visuaalisen värieron käyttäminen oli ainut nopea keino hakea lämpösuora perunan reunasta kohti keskustaa. Tällä tavoin oli mahdollista ottaa huomioon pienet poikkeamat perunan muodossa ja koossa. Lämpösuora otettiin lämpökuvan värierojen perusteella perunan reunasta reunaan keskikohdan kautta. Haittana oli epätarkkuus: ThermaCam QuickReport -ohjelman työkalujen ja kuvan tarkkuus ei parantunut juurikaan edes suurentamalla, koska myös työkalut suurenvat suurennuksen myötä. Lämpösuora pyrittiin kuitenkin ottamaan mahdollisimman tarkasti siten, että lopullista lämpösuoraa tarkasteltaessa sen päistä voitiin tarvittaessa hylätä 1–2 merkittävästi vierekkäistä pikseliä alemman lämpötilan omaavaa lämpötilatietoa. (Kuvio 11)

### Aineiston jatkokäsittely

Otannan menetelmäksi valittiin lämpösuoran ottaminen suoraan kuvasta visuaalisen värieron perusteella. Perunan säteen mitaksi valittiin säteen keskimääräinen

mitta 18 mm, jolloin satunnaisten pienempien yksilöiden keskipiste meni keskimäärin millin ohi, ja satunnaisten isompien yksilöiden keskipiste noin millin alle keskipisteen

Lämmön eteneminen reunasta kohti perunan keskustaa havainnoitiin 2 millimetrin mittapistein, jolloin vain joka neljäs lämpötila-arvo suoralla otettiin huomioon. Jokaisesta kuvasta otettiin neljä suoraa joko vaaka- tai pystysuunnassa, ja kun yhtä aikapistettä kohtaan oli maksimissaan 5 kuvaa, saatiin kokoon 20 lämpösuoraa.

Kun kaikki data yhtä aikapistettä kohden oli koottu yhteen, tulokset arvioitiin Excelin kaavioiden avulla (Katso Kuvio 44: Kokonaisnäkyvät Vesi- ja nyttikeittojen 16 minuutin lämpösuorista.) Mikäli lämpösuorissa havaittiin suuria poikkeamia, erityisesti jäähtymistä verrattuna muihin, lämpökuvan ottamiseen kulunut aika tarkistettiin videolta. Samaten tarkistettiin kuvatus perunan paino verrattuna muihin yksilöihin. Näistä 20 lämpösuorasta saatettiin siis hylätä yhden keiton neljä lämpösuoraa tai yksittäisiä lämpösuoria, jos yhdessä keitossa jokin lämpösuora poikkesi muista.

## **4.2 Rakenteen ja solutason analyysit**

Perunan rakenteen ja solutason analyysit on toteutettu kesällä 2012 vuoden 2011 sadon Melody-perunasta. Näihin analyysihin perunoiden esivalmistelu poikkesi kahdella tavalla edellisen vuoden lämmönsiirtotutkimusten materiaaleista. Ensinnäkin, analyysit toteutettiin pienissä erissä, joten pyöreät perunat veistettiin mittoihinsa käsin työntömittaa apuna käyttäen. Toiseksi, näitä perunoita ei tarvinnut säilyttää säilöntäliuoksessa, koska tutkimukset tehtiin pian esivalmistelujen jälkeen. Tämä oli hyvä asia, sillä säilöntäliuos aiheuttaa perunan pintakerrokseen muutoksia, jotka olisivat tässä tutkimusvaiheessa olleet haitaksi.

### **4.2.1 Mikroskooppikuvaukset**

#### **Mikroskooppikuvauksien toteutus**

Perunan rakenteen muutoksia seurattiin kameralla ja lisävalolla varustetulla läpivalaisumikroskoopilla. Vaikka mikroskooppikuvien saaminen erityisesti kypsästä perunasta oli haasteellista, siihen lopulta harjaantui, ja tulokseksi saatiin kelvollisia

kuvia. Perunan kypsymisen mikroskopoinnin lähtökohtana oli tutkia sekä tärkkelyksen gelatinoitumista että solurakenteen muutoksia kypsymisen aikana. Kypsymisen aikajanelta pyrittiin valitsemaan olennaiset muutosten aikapisteet. Seurantaan valittiin keittoajat 4 ja 6 minuuttia erityisesti gelatinoitumisen vuoksi, sekä 12, 14, 16 minuuttia perunan kypsymisen loppuvaiheen solumuutosten seuraamiseksi.

Mikroskooppikuvaukseen keitettiin aina yksi peruna kerrallaan samoin menettelyin kuin lämpökuvauksissa. Määrätyn keittoajan täytyessä peruna nostettiin keitosta, halkaistiin ja halkaisupinta jäädytettiin kylmävaraajan pinnalla pikaisesti. Tämän jälkeen leikattiin puoliskot vielä neljänneksiksi, ja käytettiin näiden leikkauspinnat jälleen kylmävaraajan pinnalla. Tämä menettely tehtiin siksi, että esitesteissä oli todettu lämmön etenemisen jatkuvan perunassa vielä pitkään keitosta noston jälkeenkin, vaikka perunan upottaisi jääveteen. Mikroskooppia varten kaikki halkaisupinnat tehtiin 80 mm leveällä partaterän tyypisellä terällä.

Jäädytetyistä halkaisupinnoista oli käytettävissä maksimissaan 8 leikettä kuvaamaan perunan solurakennetta reunasta keskipisteeseen. Näistä yleensä onnistui muutama, jotka siirrettiin objektilasille ja värjättäväksi saman tien. (Kuvio 13)



Kuvio 13: Perunan mikroskooppileikkeitä värjätymässä jodihöyrykammiossa

Mikroskooppileikkeiden värjäyskammioon oli laitettu jodi sublimoitumaan etukäteen. Jodihöyrytykseen käytettiin kannellista isoa lasikuutioastiaa, jonka pohjalle oli laitettu imupaperi, vähän tislattua vettä ja pieni määrä jodikiteitä. Värjäytyminen alkoi yleensä välittömästi. Kun sopiva värjäystaso oli saavutettu, siirrettiin objekti- lasit välittömästi ulos kammion kylmävaraajan päälle, jotta jodin haihtuminen perunan pinnasta hidastuisi. Kylmävaraajasta huolimatta mikroskopointi tuli tämän jälkeen tehdä nopeasti ennen kuin jodi ehti haihtua uudelleen. Lämpimän mikroskoopin lampun alla jodin haihtuminen kiihtyi edelleen, joten yhdeltä leikkeeltä ei välttämättä saanut muutamaa otosta enempää. Kylmävaraajan avulla pyrittiin pienentämään jodin höyrynpainetta huoneenlämmössä.

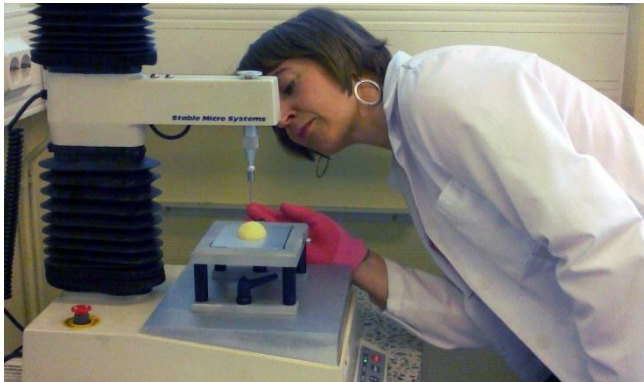
Olennaista perunaleikkeiden mikroskopoinnissa oli selkeän näkymän hakeminen, ja vasta seuraavaksi tarkistettiin sen positio leikkeellä. Saatu kuva nimettiin etäisyyden (reunasta) ja keittoajan mukaan.

## 4.2.2 Rakennemittaukset

### Perunan rakennemittauksien toteutus

Perunan kypsymisen rakennemittauksien lähtökohtana oli tutkia juuri keitetyn perunan ominaisuuksia, eli rakenne tuli testata välittömästi keitosta poiston jälkeen. Lisäksi, seurantaan rajattiin nimenomaan kypsymisvaihe, eli rakennemittauksilla pyrittiin toteamaan, missä vaiheessa peruna kypsyy. Seurantaan valittiin keittoajat 10, 12, 14, 16 minuuttia.

Keitosta poiston jälkeen peruna halkaistiin varovasti ohuella partaterän tyypisellä terällä. Erityisesti kypsän perunan käsittelyssä saattaa syntyä halkeamia, jotka pilaavat mittaustuloksen.



Kuvio 14. Rakennemittaus 2 mm:n sylinterillä. Kuvassa seurataan sylinterin osu-  
mista perunan puoliskon keskikohtaan.

Mittausanturina käytettiin 2 mm:n sylinteriä (P/2), joka porautuu perunan puoliskon keskeltä ulkopinnasta kohti keskustaa (Kuvio 14). Voima-alueena oli tarkkuudeltaan herkempi 5 kilon mittausalue, joka sopi perunan kypsymisen tutkimiseen. Mittausanturin etenemisnopeus perunan sisällä oli 3mm/s. Jokaisesta keitosta tehtiin vähintään 3 toistoa siten, että mikäli mitattavissa perunoissa ilmeni halkeamia tai muita suurta virhettä aiheuttavia poikkeamia, toisto hylättiin ja tehtiin uudelleen. Jokaisesta keitetystä perunasta tehtiin 2 mittausta eli molemmista perunanpuoliskoista, jolloin loppusaantona oli 6 mittausta keittotapaa kohden.

## 5 TULOKSIA KOLMELLE KYPSENNYSTAVALLE

Kypsymisen kuvausmenetelmän kehitystyön ohella saatiin runsaasti tietoa testattavista keittotavoista. Koska nämä tulokset on saatu juuri menetelmän kehitystyössä, eivät työskentelytavat olleet työtä tehtäessä vielä loppuun asti hioutuneet. Tuloksia pyritäänkin arvioimaan tältä pohjalta kriittisesti. Samalla virheet tarjoavat tilaisuuden arvioida menetelmää ja sen kehittämistä.

### 5.1 Lämmönsiirtymistutkimusten tulokset

Lämmönsiirtymistutkimuksissa koottu mittausaineisto oli kohtuullisen laaja. Pelkissä keittokokeissa jokaista kolmea keittotapaa testattiin 15 keittosessiolla, joista ensisijaisia lämpökuvia kertyi 50, eli viisi kuvaa jokaisen keittotavan aikapistettä kohden. Yhteensä ensisijaisia lämpökuvia kertyi siis 150. Lisäksi, näistä yhteensä 45 keittosessiosta saatiin taltioitua 40 onnistunutta jatkuvaa termopariseurantaa alusta loppuun. Näiden lisänä ovat vielä keittojen jäähdytysmittaukset sekä raa'an ja kypsän perunan vertailu.

Vaikka jokaisen keittotavan yhtä aikapistettä kohden oli 5 ensisijaista lämpökuvaa, näistä kuitenkin hyväksyttiin tuloksiin vain ne, joiden kuvausviiveet pysyivät tavoiteterajoissa. Hyväksymis- ja hylkäämisperusteet on selvitetty kappaleessa 5.1.4.

#### 5.1.1 Yleiskatsaus: Lämmön etenemisen seuranta eri keittomenetelmillä

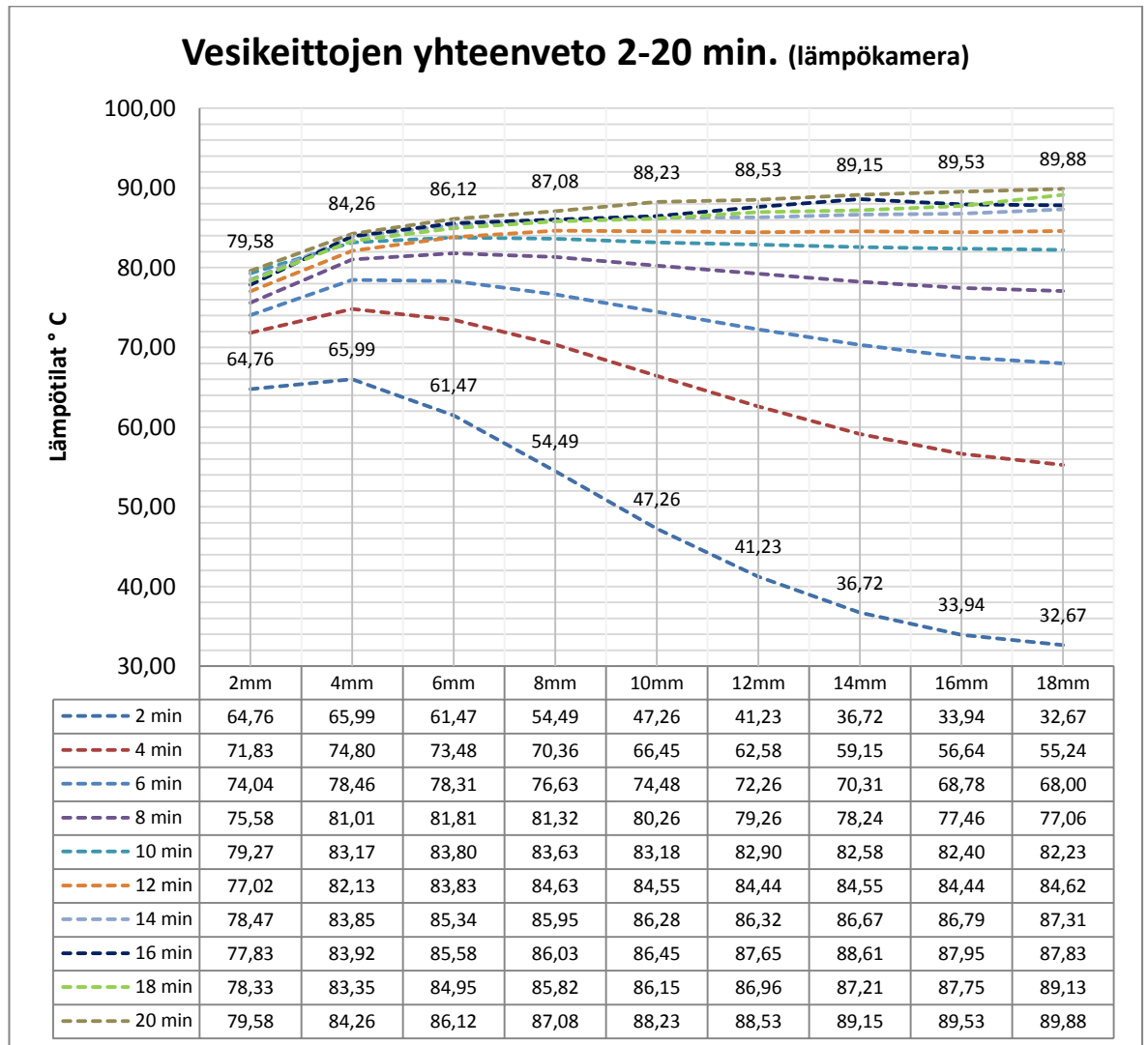
Seuraavilla sivuilla esitellään yleiskatsaus lämpötilojen etenemisestä perunan sisällä reunasta kohti keskustaa. Vertailussa on kolme keittotapaa, vesikeitto, höyrykeitto ja höyrykeitto paperinyytissä, josta käytetään lyhempää ilmaisua nyyttikeitto.

Kuvioissa 15, 17 ja 19 yksi lämpökäyrä tarkoittaa yhden aikapisteen mitattuja lämpötiloja perunan eri kohdissa, ja alimpana ovat aina 2 minuutin aikapisteesä mitatut lämpötilat. Kuviossa katkoviivaa on käytetty pelkästään havainnollistamisen helpottamiseksi, ja varsinaiset lämpötilatiedot sijoittuvat pystysuorille arvoviivoille. Lämpökameran tuottaman datan perusteella voidaan siis nähdä lämpörintaman eteneminen kohti 100 °C:n lämpötilaa. Tätä ei kuitenkaan koskaan näissä lämpö-



kuvissa saavuteta, koska lämpökuva on taltioitu useita sekunteja keitosta noston jälkeen. Kun perunan lämpötila ylittää höyrystymisen rajan reunasta alkaen, se näkyy huomattavana jäähtymisenä. (Katso kappale 5.1.4).

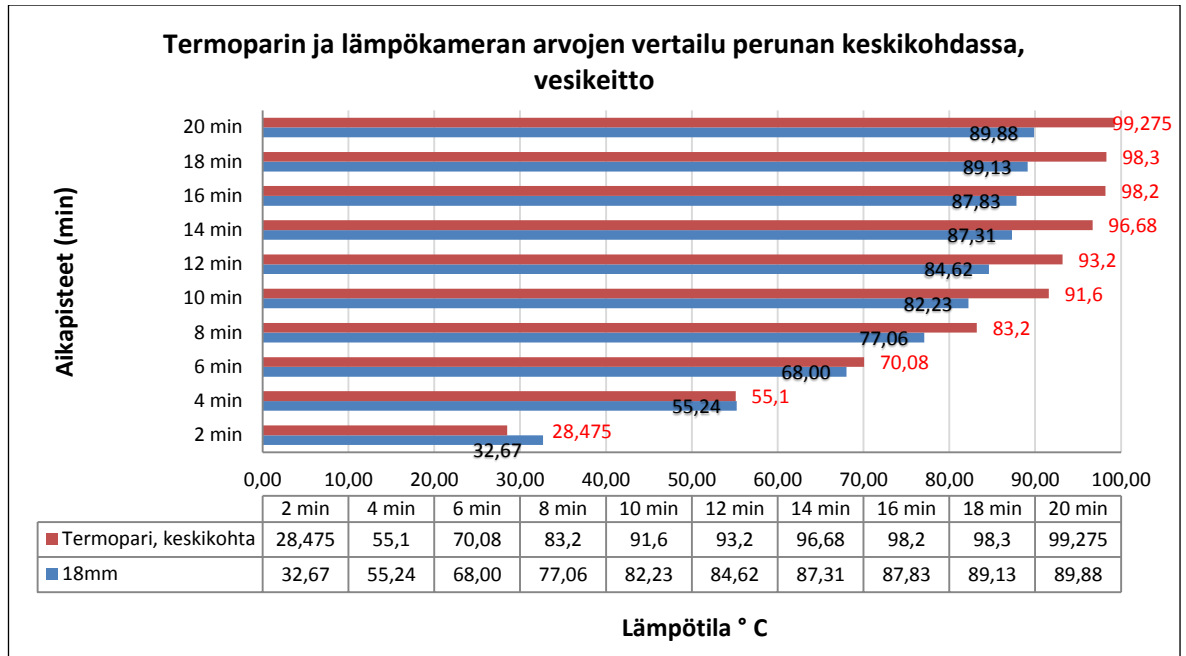
### Vesikeitot



Kuvio 15: Vedessä keitetyn perunan lämpötilat mitattuna 2 minuutin ja 2 mm:n välein perunan ulkoreunasta keskipisteeseen.

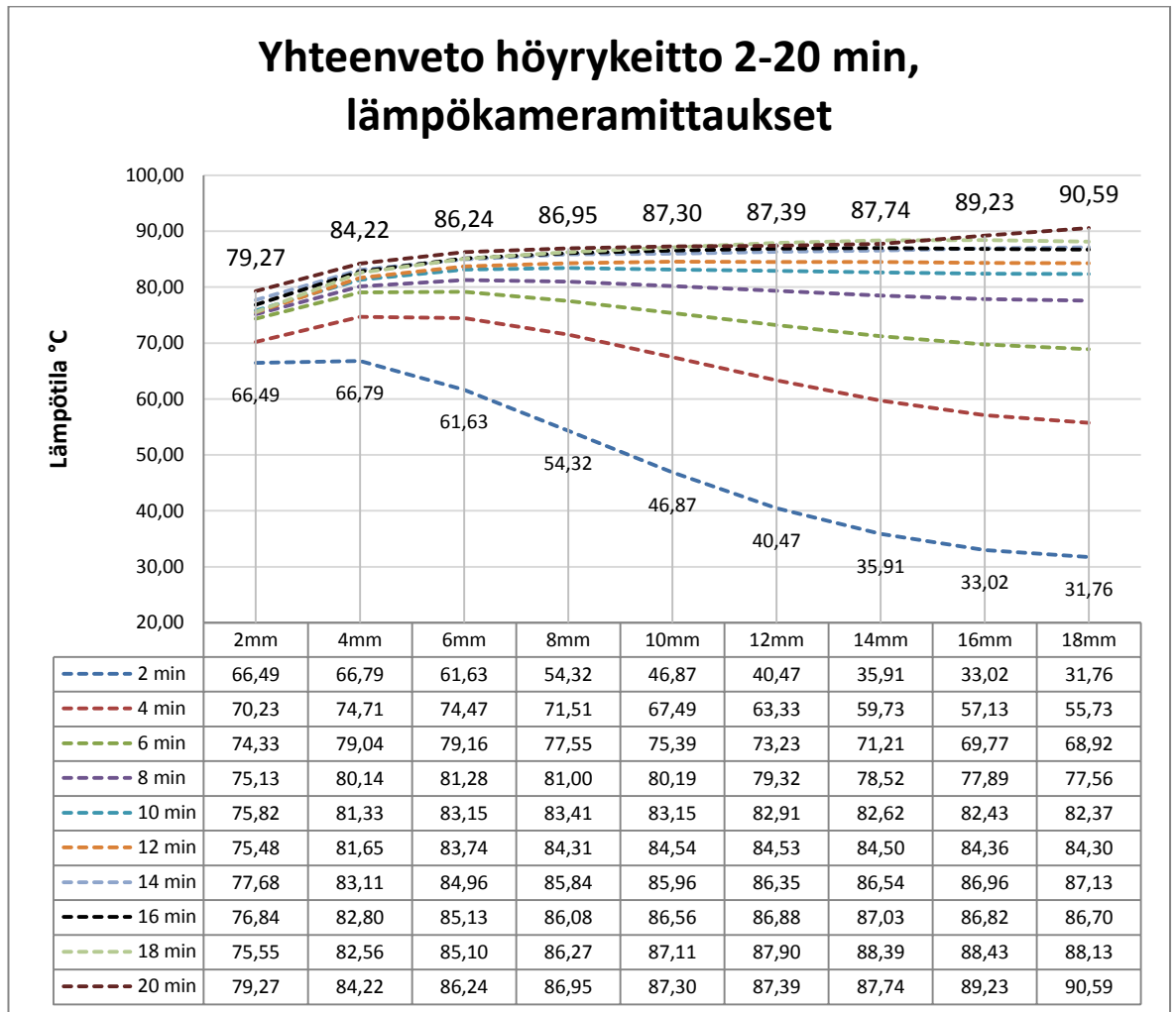
Toisessa kuviossa (Kuviot 16, 18 ja 20) on esitetty vertailutieto termoparimittauksista keskikohdan osalta. Termoparin lämpötila on taltioitu suoraan kattilassa olevasta vertailuperunasta, jota ei poisteta keiton aikana ollenkaan. Termopari-lämpökameravertailusta voidaan nähdä, että mitattujen lämpötilojen arvot alkavat poiketa toisistaan 6-8 minuutin keiton jälkeen, jolloin lämpötilat ovat nousseet niin

korkealle, että höyrystyminen on voimakasta. Kun lämpötila on saavuttanut maksiminsa, lämpösuorat ovat päällekkäisiä. Kuvausviive on keskimäärin sama kaikilla kuvilla, jolloin myös jäähtymistä tapahtuu keskimäärin saman verran. Jäähtyminen aiheuttaa kuitenkin eniten epätarkkuutta juuri korkeissa lämpötiloissa.

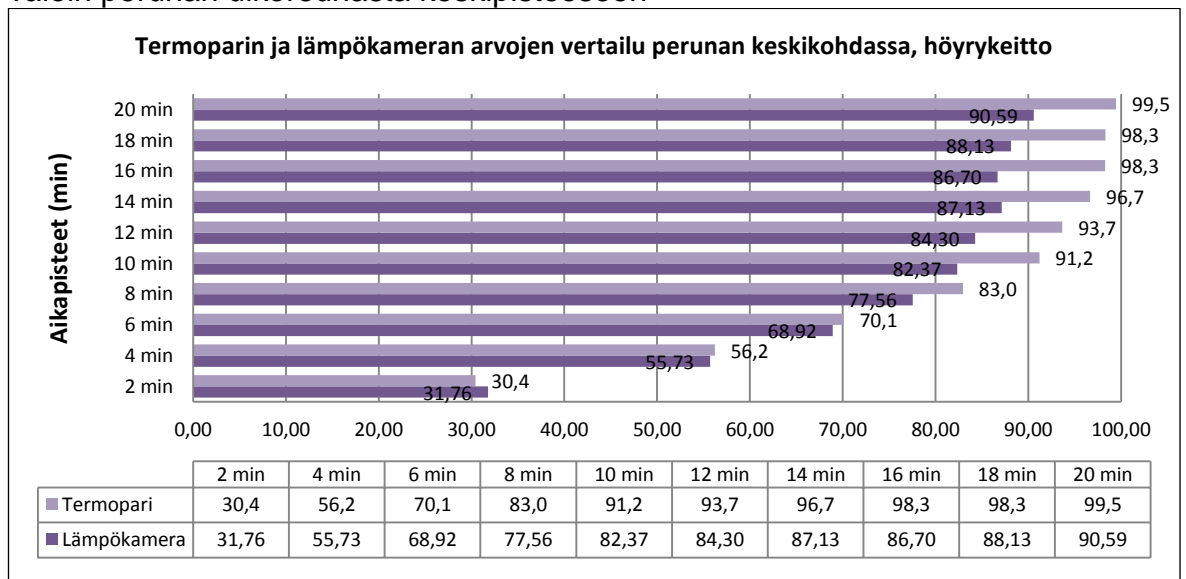


Kuvio 16. Vesikeitto: Keskikohdan lämpötilat lämpökameralla ja termoparilla

## Höyrykeitot

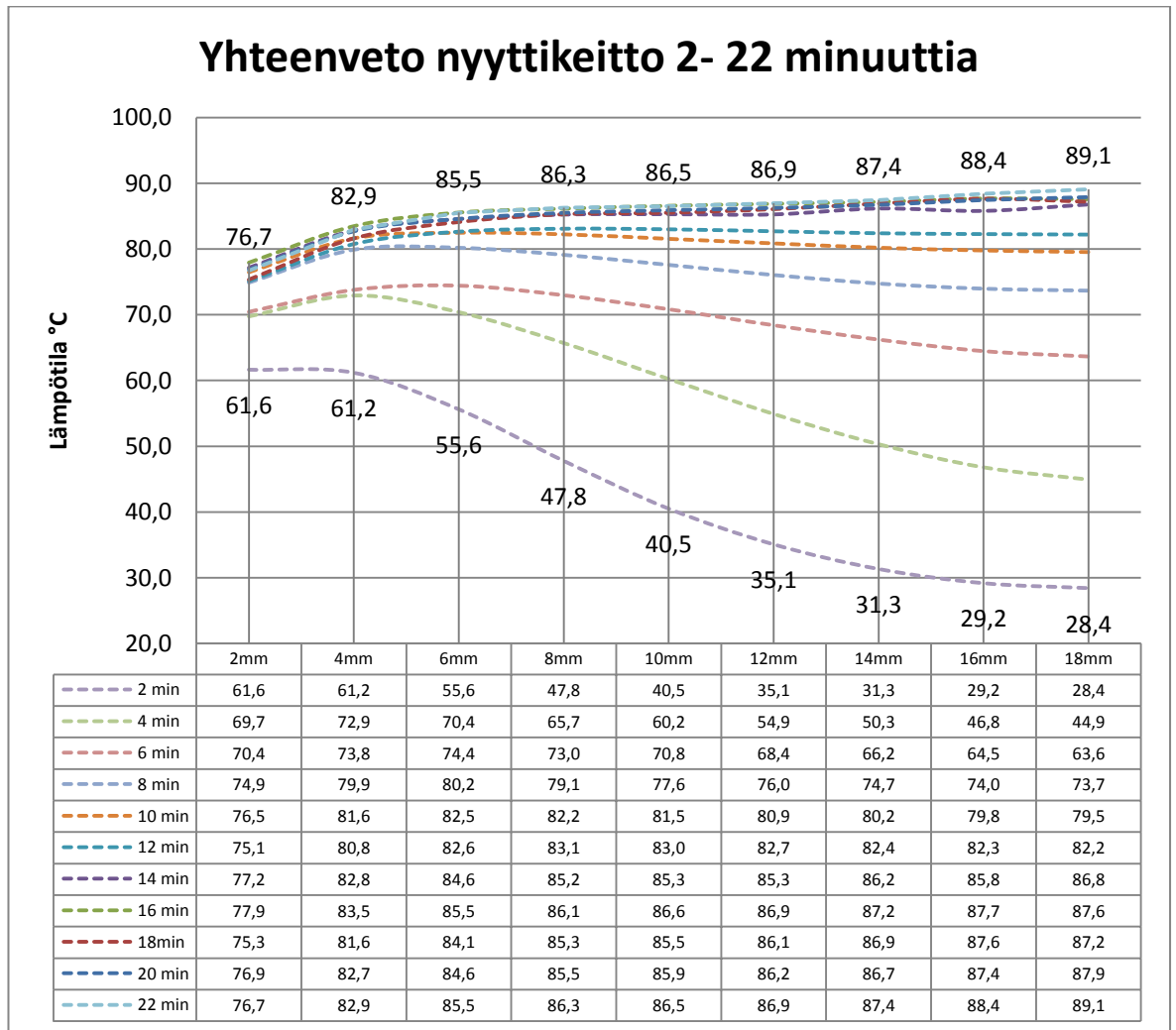


Kuvio 17: Höyryssä keitetyn perunan lämpötilat mitattuna 2 minuutin ja 2 mm:n välein perunan ulkoreunasta keskipesteeseen

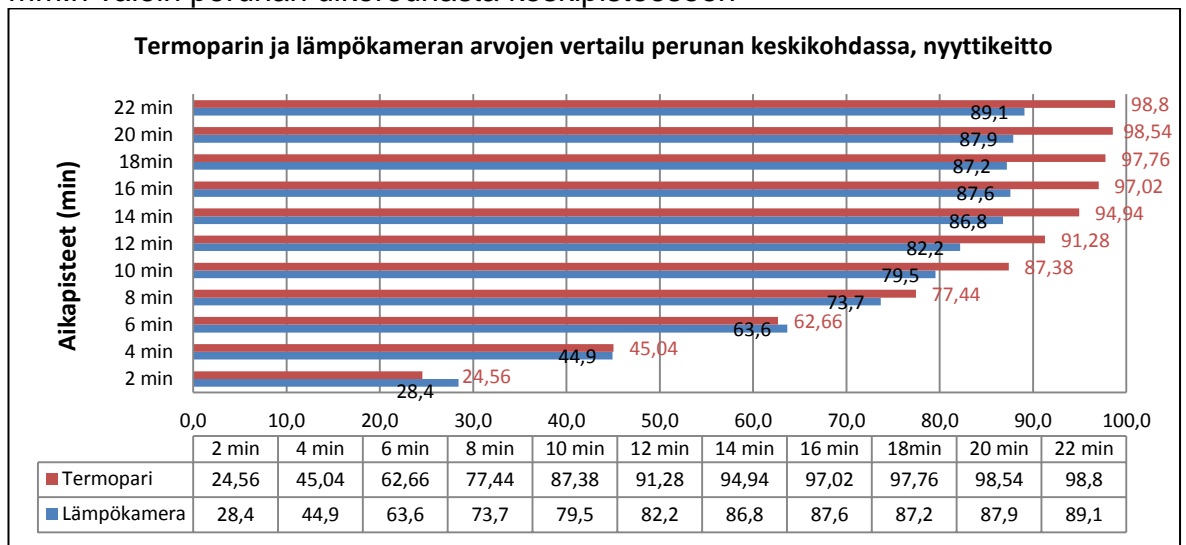


Kuvio 18. Höyrykeitto: Keskikohdan lämpötilat lämpökameralla ja termoparilla

## Nyttikeitot



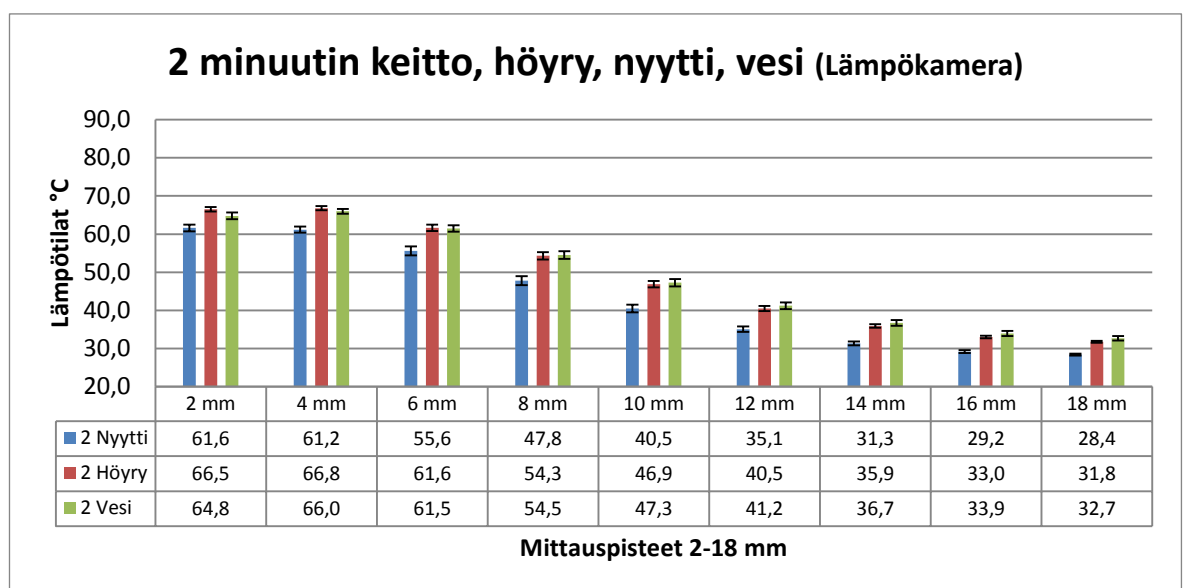
Kuvio 19. Höyrynyytissä keitetyn perunan lämpötilat mitattuna 2 minuutin ja 2 mm:n välein perunan ulkoreunasta keskipisteeseen



Kuva 20. Nyttikeitto: Keskikohdan lämpötilat lämpökameralla ja termoparilla

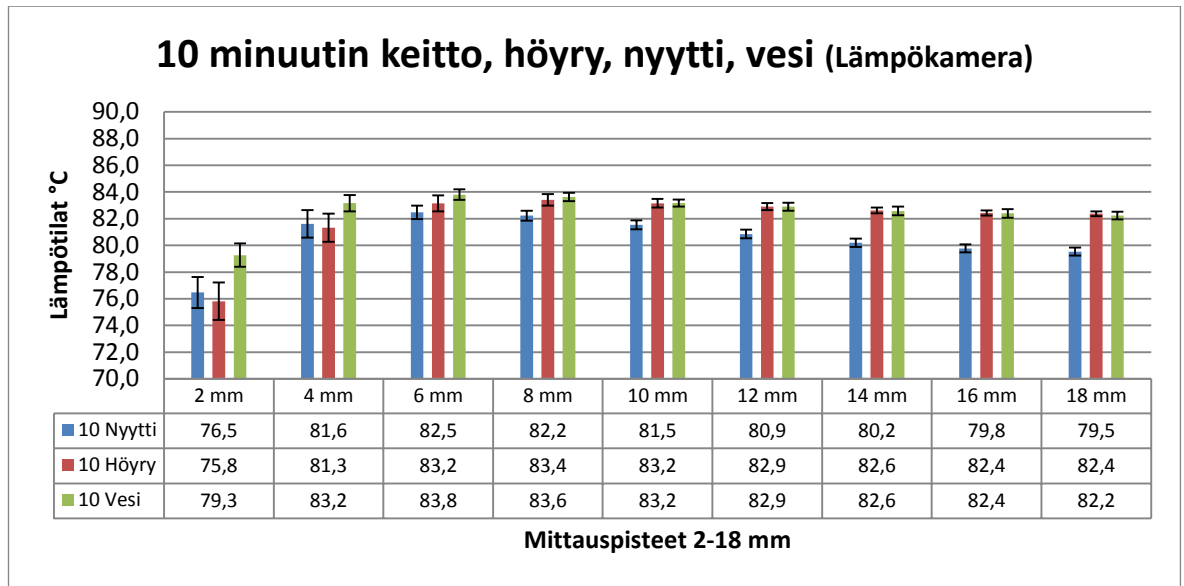
## 2-, 10- ja 20 minuutin keitot, vertailu

Verratessa eri keittomenetelmien lämpötilamittauksien tuloksia, näissä erottuu selvästi höyrynyytin eristävä vaikutus, mikä näkyy lämmön etenemisen hitautena. Mittaustilanteessa tapahtuneesta jäähtymisestä huolimatta mittaustulokset ovat loogisia, ilmaisten höyry- ja vesikeiton lämpötilojen samankaltaisuuden. Erityisesti reunasta mitatuissa lämpötiloissa on suurempia keskinäisiä eroja, johtuen reunan voimakkaasta jäähtymisestä. Seuraavissa eri keittotapojen vertailua esittävässä kuvioissa näkyy myös keskivirheet. (Kuvio 21, Kuvio 22, Kuvio 23)



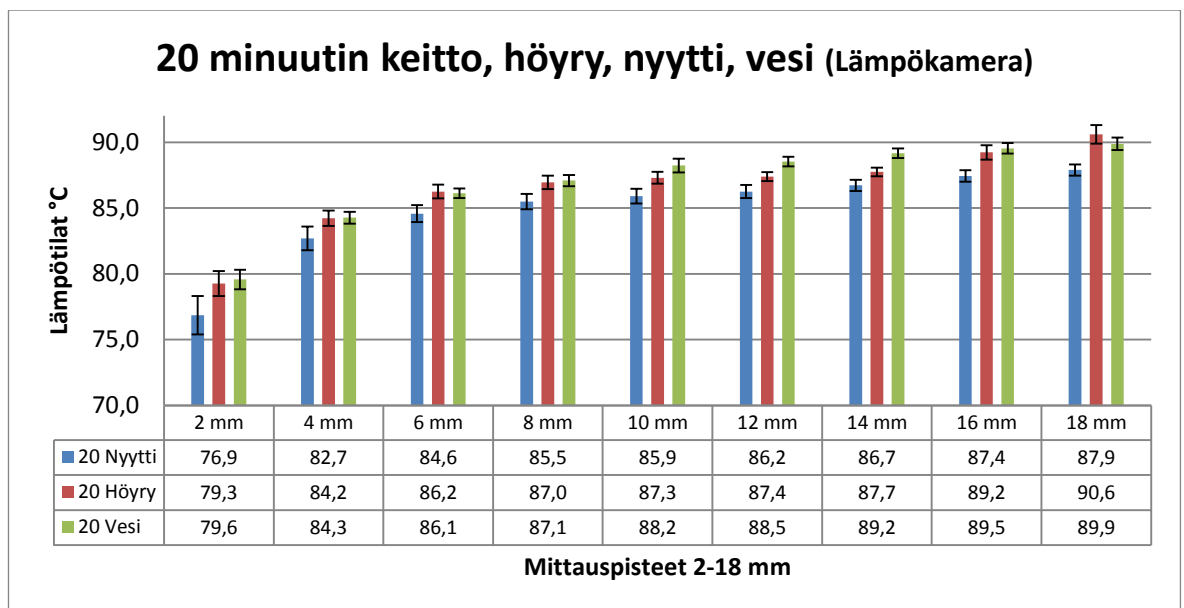
Kuvio 21. 2 minuutin keiton vertailu eri keittotapojen kesken

Kahden minuutin keitossa (Kuvio 21) keskivirhe on tasaisen pieni jokaisessa mitaustepisteessä. Jäähtymisellä ei tässä vaiheessa ole suurta vaikutusta, koska lämpötilaerot huoneen lämpöön verrattuna eivät ole vielä suuria. Kymmenen minuutin keitossa reunan jäähtyminen alkaa näkyä suurempana virheenä.



Kuvio 22. Kolmen keittotavan vertailu 10 minuutin keiton jälkeen

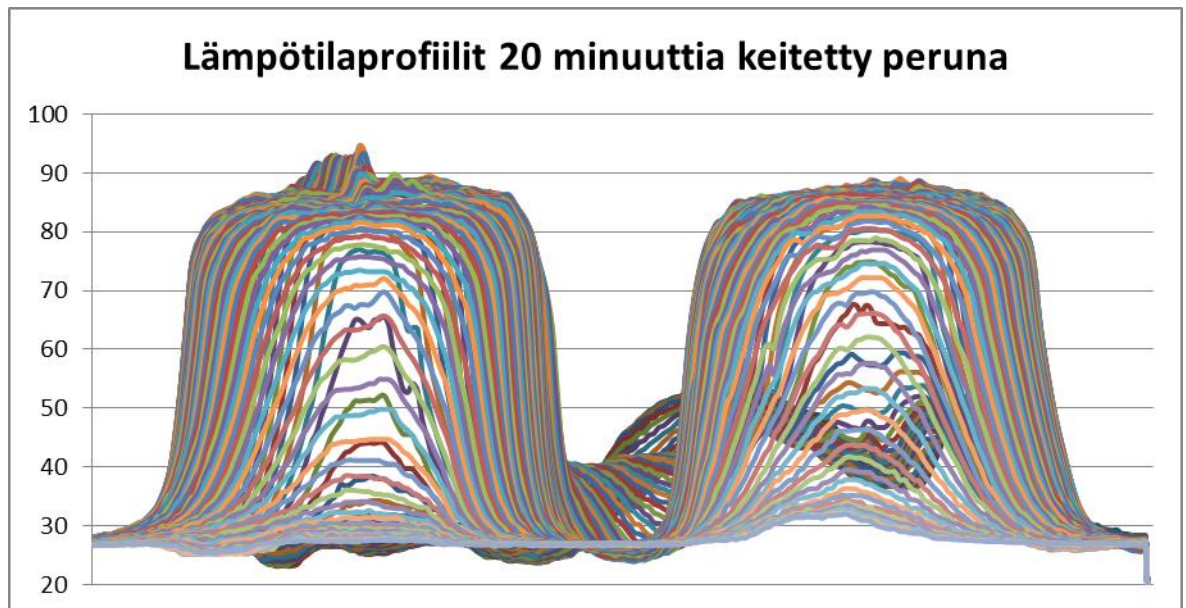
10 minuutin keiton (Kuvio 22) lämpötilat ovat höyry- ja vesikeiton kesken samankaltaisia reunoja lukuun ottamatta. Perunan leikkauspinta on ehjä, mikä ilmenee tasaisina mittaustuloksina.



Kuvio 23. Keittotapojen vertailu 20 minuutin keiton jälkeen

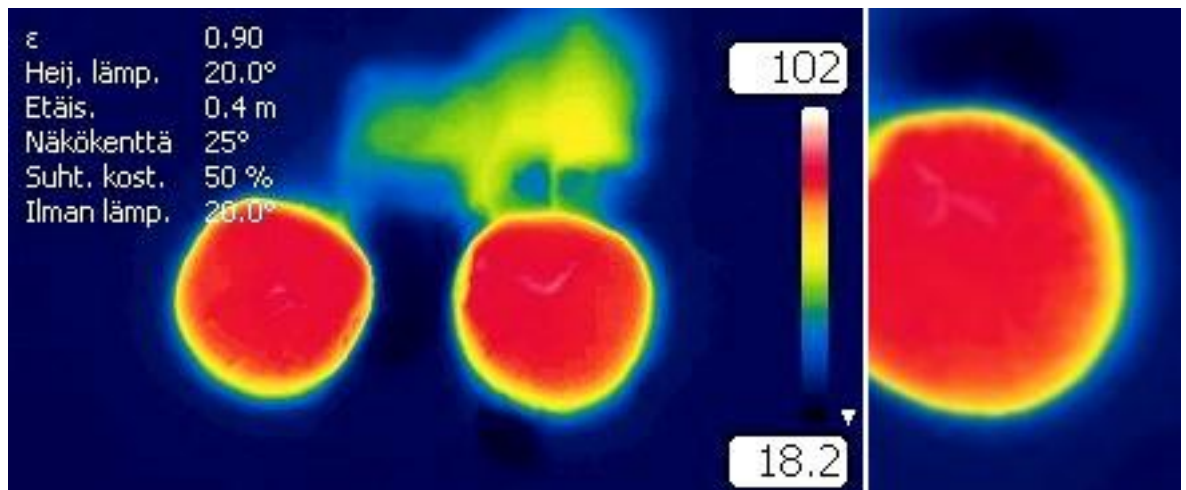
20 minuutin keiton jälkeen tutkimuskohteena ollut 36 mm:n peruna on hyvin kypsä, etenkin vesi- ja höyrykeiton jälkeen (Kuvio 23). Kypsässä perunassa esiintyy tällöin halkeamia, joista lämpö purkautuu. Lämpötilaprofiilissa tämä halkeamista pur-

kautuva lämpö näkyy rönsymäisinä kohoumina. Ilmiötä havainnollistavat kuvat 25 ja 26.



Kuvio 24. Lämpötilatietojen perusteella tehty profiili 20 minuuttia keitetystä halkaisusta perunasta.

Halkeamat aiheuttavat lämpötilatietoihin poikkeamia, sillä suurin osa lämpökuvan tiedoista on lähtöisin jäähtyneestä pinnasta.



Kuvio 25: Lämpökuvissa halkeamat näkyvät vaaleina viiruina.

### 5.1.2 Lämpötilojen muutosten nopeus

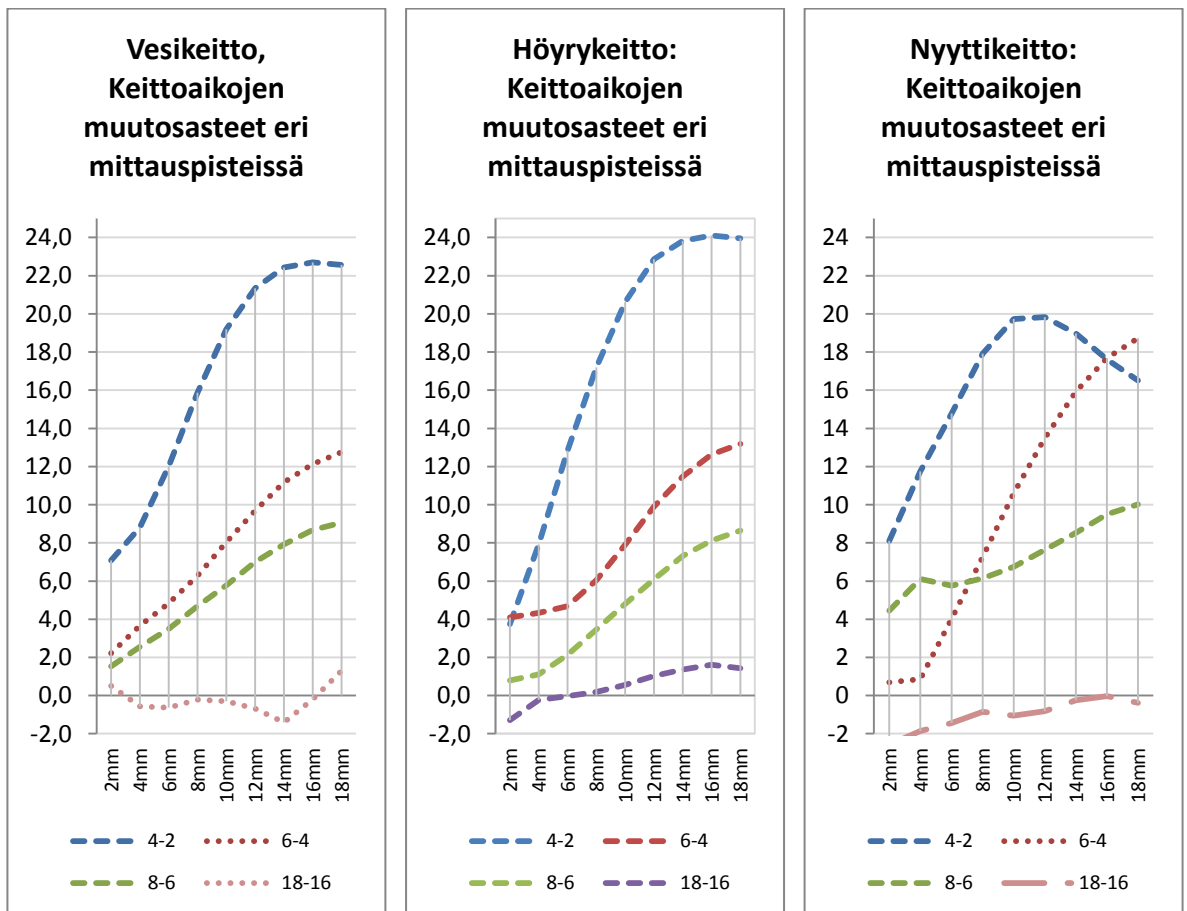
Keitossa perunan sisälämpötilat nousevat alussa voimakkaasti, koska lämpötilaero höyryn tai veden ja perunan sisälämpötilan välillä on suuri. Kun lämpötilaerot alkavat pienentyä, nousuvauhti hidastuu. Lämpötilojen muuttumisen vauhtia eri kohdissa perunaa voidaan seurata vertaamalla kunkin aikapisteen arvoa edelliseen. Esimerkiksi 12 minuutin aikapisteen lämpötilaa on verrattu 10 minuutin aikapisteen lämpötilaan, jolloin kaaviossa näkyvä arvo on näiden erotus. Teoreettinen nousuvauhdin hidastuminen on aleneva käyrä. Mikäli vauhdin muutoksissa kuitenkin näkyy poikkeuksia, saattaa kyseessä olla faasin muutos, mikä voi olla yksi kypsy- mistapahtuman käännekohta. Tällainen poikkeus näkyy siinä, että lämpötilan nopeuden hidastumisen jälkeen nopeus kasvaa.

Muutosnopeuden seurannassa verrataan aina kahden peräkkäisen aikapisteen lämpötiloja. Koska lämpökuvauksien tuloksissa jokainen keiton peräkkäinen aikapiste on lähtöisin eri keittoerästä, lämpötilojen vertailuparit ovat keskenään satunnaisia. Tulokset, keskiarvot ja keskivirheet on laskettu hyväksytyjen lämpötila- arvojen perusteella, jolloin vertailussa mukana olevien arvojen määrä on aina se minkä verran on vertailtavia pareja käytettävissä.



## Lämpötilojen muutokset perunan sisällä

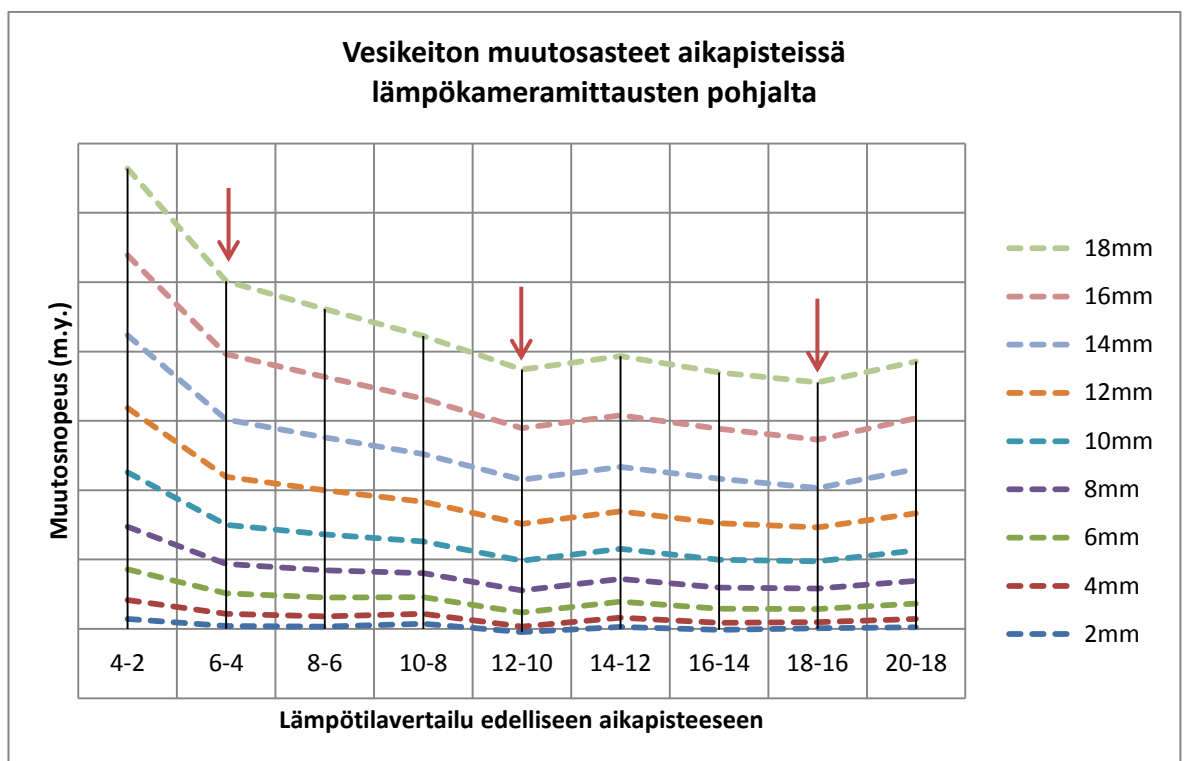
Perunan sisällä tapahtuvassa lämmön etenemistapahtumassa lämpötilan muutokset ovat suuria niin kauan kun lämpötilaeroja esiintyy perunan sisällä. Seuraavissa kuvioissa (Kuvio 26) on esitetty keittojen lämpötilojen muutoksen nopeus eri kohdissa perunaa tietyinä aikana. Nyttikeitto poikkeaa tässä kahdesta muusta siten, että keskiosassa muutos ei 2–4 minuutin välillä ole vielä niin suuri kuin höyry- ja vesikeitolla. Tämä näkyy seuraavalla vertailuajavälillä 6–4 minuuttia, missä nyttikeitolla on huomattavasti suurempi muutosaste keskikohdassa kuin höyry- ja vesikeitolla. Myöhemmissä keittovaiheissa muutosaste perunan sisällä tasaantuu, jolloin tietyllä aikavälillä muutoksen aste on samansuuruinen sekä perunan sisällä että reunassa.



Kuvio 26: Keittojen muutosasteet keittoajoittain eri mittauspisteissä

## Muutosnopeudet aikapisteittäin

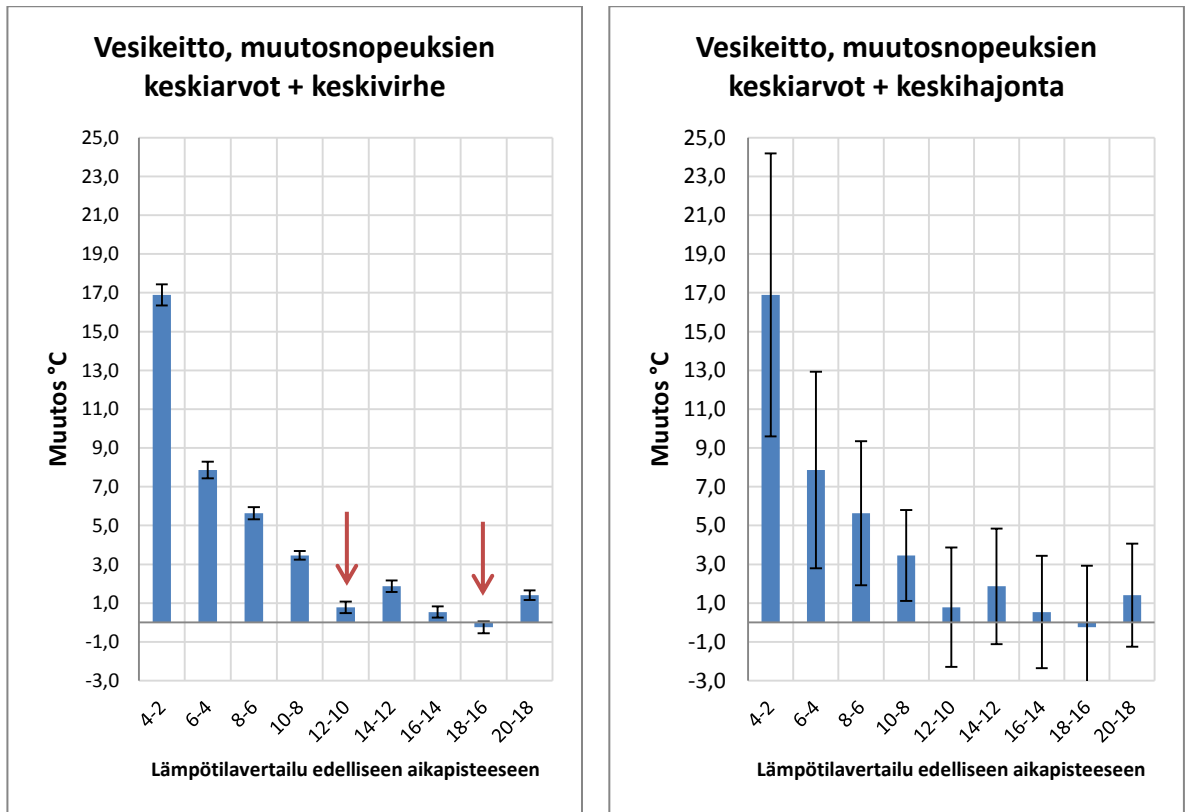
Kun havainnoidaan muutosten nopeutta aikapisteissä, edellä esitetyt muutostiedot on pyörytetty akselilta toiselle. Käytössä on pinottu viivakaavio, jossa itse muutoksen lukuarvolla ei ole merkitystä (Kuviot 27, 29 ja 31). Nyt tarkoituksena on osoittaa nopeuden muutoksessa tapahtuva poikkeama ja sen aikapiste. Vertailujen aikaväleistä puhuttaessa kyseessä oleva aikapiste on aina vertailun myöhäisempi aikapiste. Esimerkiksi 6–4 minuutin aikavälin muutos on muutos 6 minuutin aikapisteeseen verrattuna.



Kuvio 27: Vesikeiton lämpötilamuutosten vaihtelut.

Vesikeiton lämpötilamuutoksissa näkyy muutoksen hidastumiset 6, 12 ja 18 minuutin aikapisteiden kohdalla. Perunan sisällä olevissa kerroksissa on kuitenkin eroja. Esimerkiksi kuuden minuutin aikapisteen muutos ei vesikeitossa juurikaan erotu reunassa mutta lähestyessä keskikohtaa muutosnopeuden hidastuminen on havaittavissa. Tästä voidaan tehdä oletus gelatinoitumisen aiheuttaman faasinmuutoksen edistymisestä, joka vesikeitolla näyttäisi etenevän nopeasti reuna-alueilla.

Toinen kaavio (pylväskaavio, kuviot 29, 31 ja 33) esittää aikapisteiden muutosnopeuksien keskiarvoja. Näissä kaavioissa on esitetty myös tulosten keskihajonnat ja keskivirheet. Erityisesti keskihajonnat ovat suuria, ja luonnollisesti suurimmillaan ne ovat reuna-alueilla, missä jäähtyminen on voimakkainta. (Kuvio 48: Jäähtymisen eteneminen 12 sekunnin aikana).

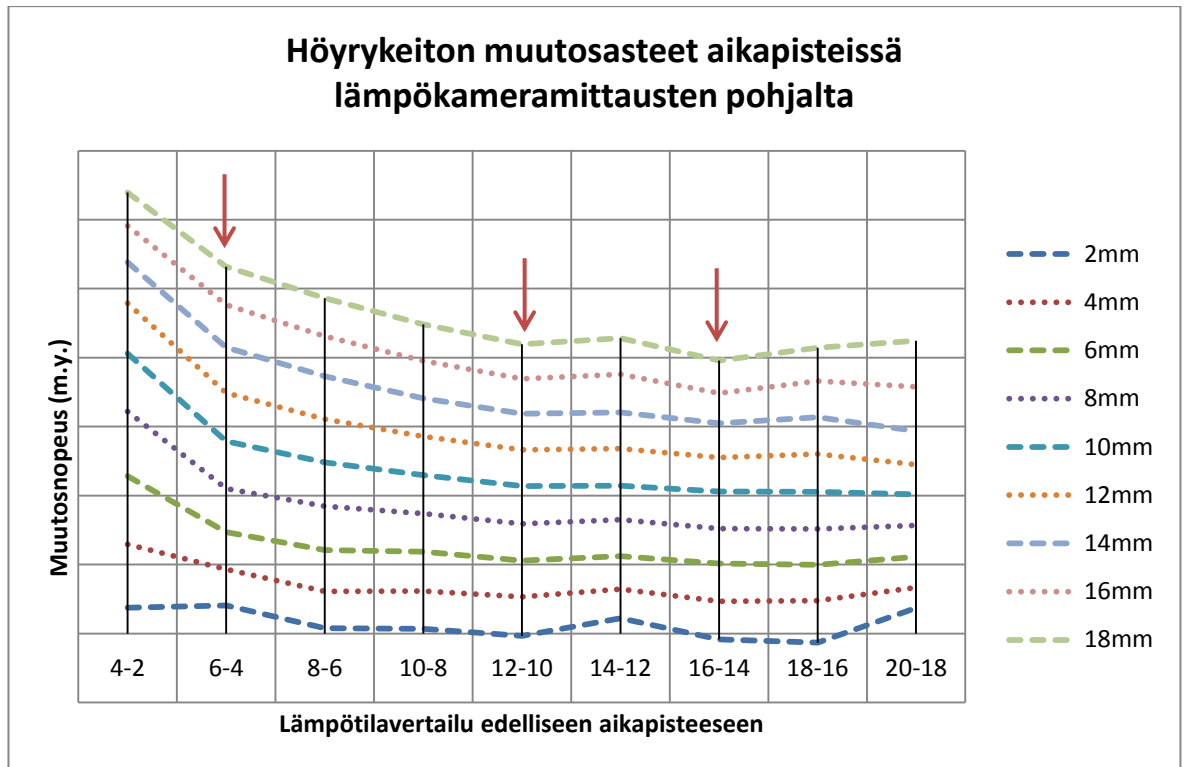


Kuvio 28: Vesikeiton muutosnopeuksien keskiarvot ja virheet

Kuvion 29 mukaan vesikeiton keskiarvojen pohjalta voidaan erottaa muutosten poikkeamat aikapisteissä 12 ja 18 selkeämmin. Kuuden minuutin aikapisteen hidastuminen ei erotu selkeästi siten, että seuraava arvo olisi edellistä suurempi. Tämä johtuu siitä, että lämpötilojen nousu hidastuu samanaikaisesti hyvin voimakkaasti. Lämpökameratulosten muutosnopeuksien keskivirheet ja -hajonnat ovat suuruusluokaltaan taulukon 4 kaltaisia kaikissa keitoissa.

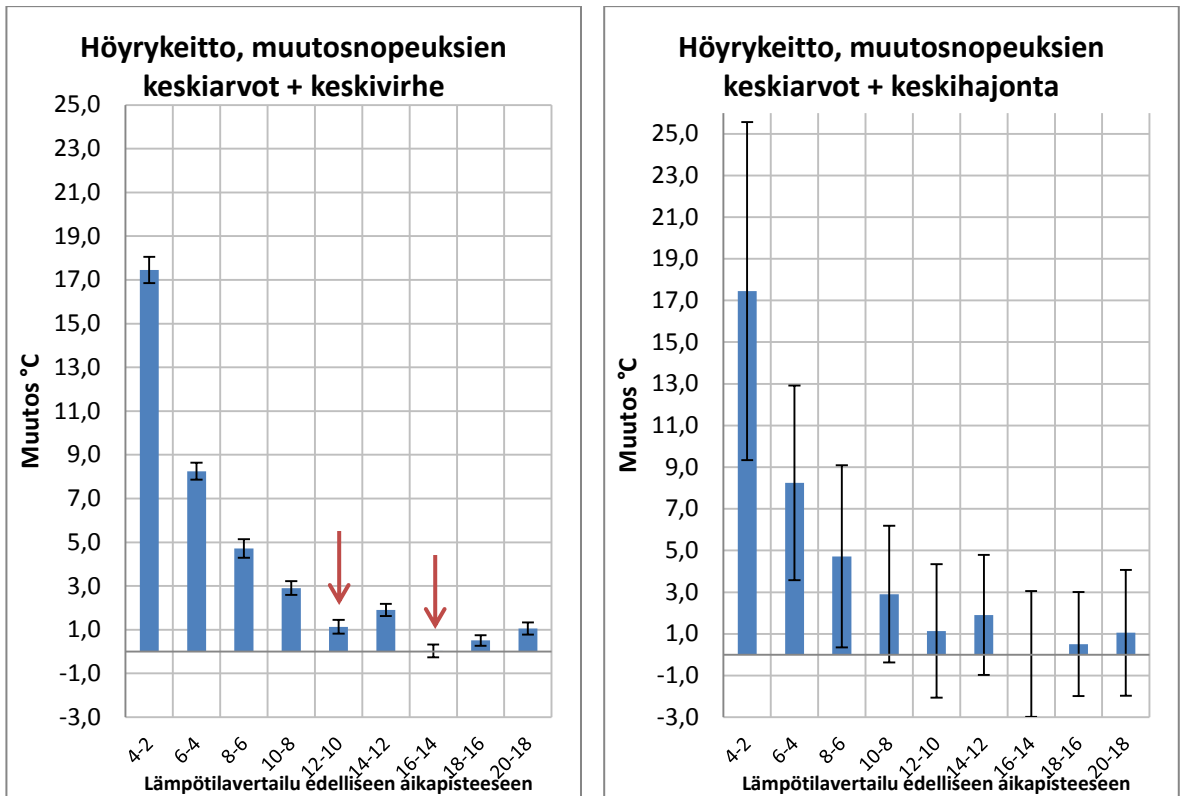
Taulukko 4: Vesikeiton muutosnopeuksien keskivirheet ja keskihajonnat

vertailuväli/min	4-2	6-4	8-6	10-8	12-10	14-12	16-14	18-16	20-18
Keskihajonta	7,30	5,06	3,71	2,34	3,08	2,98	2,89	3,17	2,66
Keskivirhe	0,54	0,42	0,31	0,23	0,30	0,30	0,29	0,31	0,25

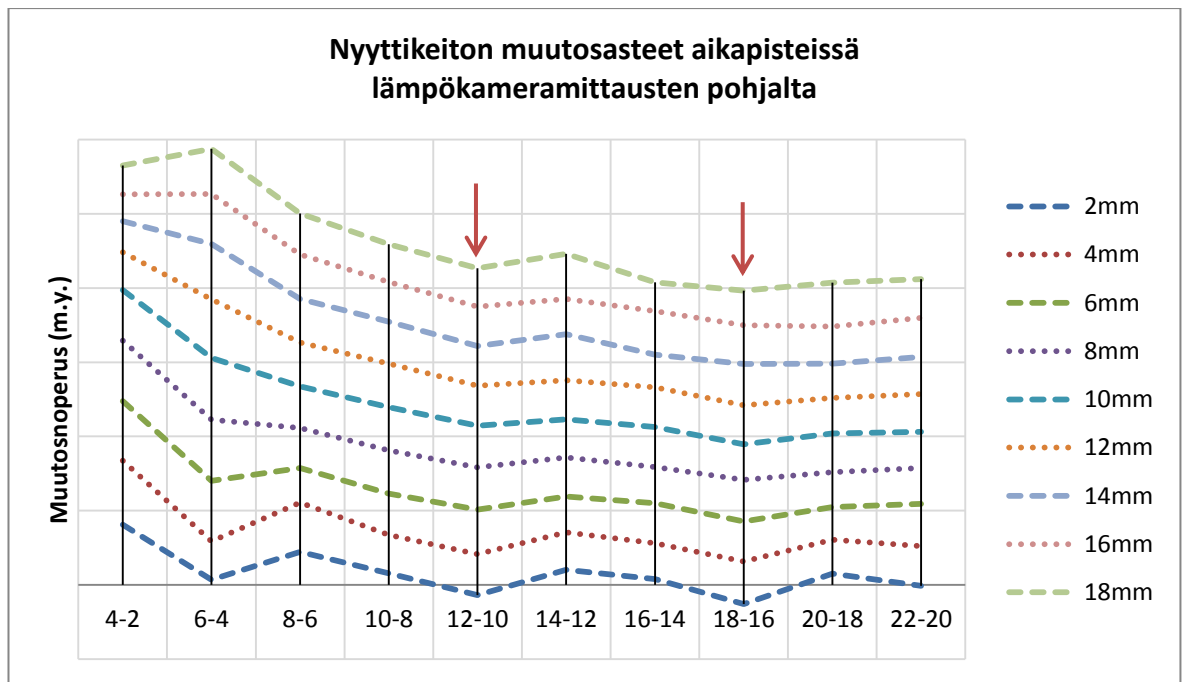


Kuvio 29: Höyrykeiton lämpötilamuutosten vaihtelut.

Höyrykeiton lämpötilan muutosnopeuksissa näkyy hidastumiset erityisesti 12 ja 16 minuutin kohdalla perunan sisällä ja reunassa (Kuvio 29). Kuuden minuutin aikapisteen muutos näkyy reunassa nopeuden nousuna ja muissa pisteissä hidastumisena, mikä ilmentää kypsymisen muutosten eri vaiheita perunan sisällä. Samat ilmiöt erottuvat myös keskiarvoista. (Kuvio 30)



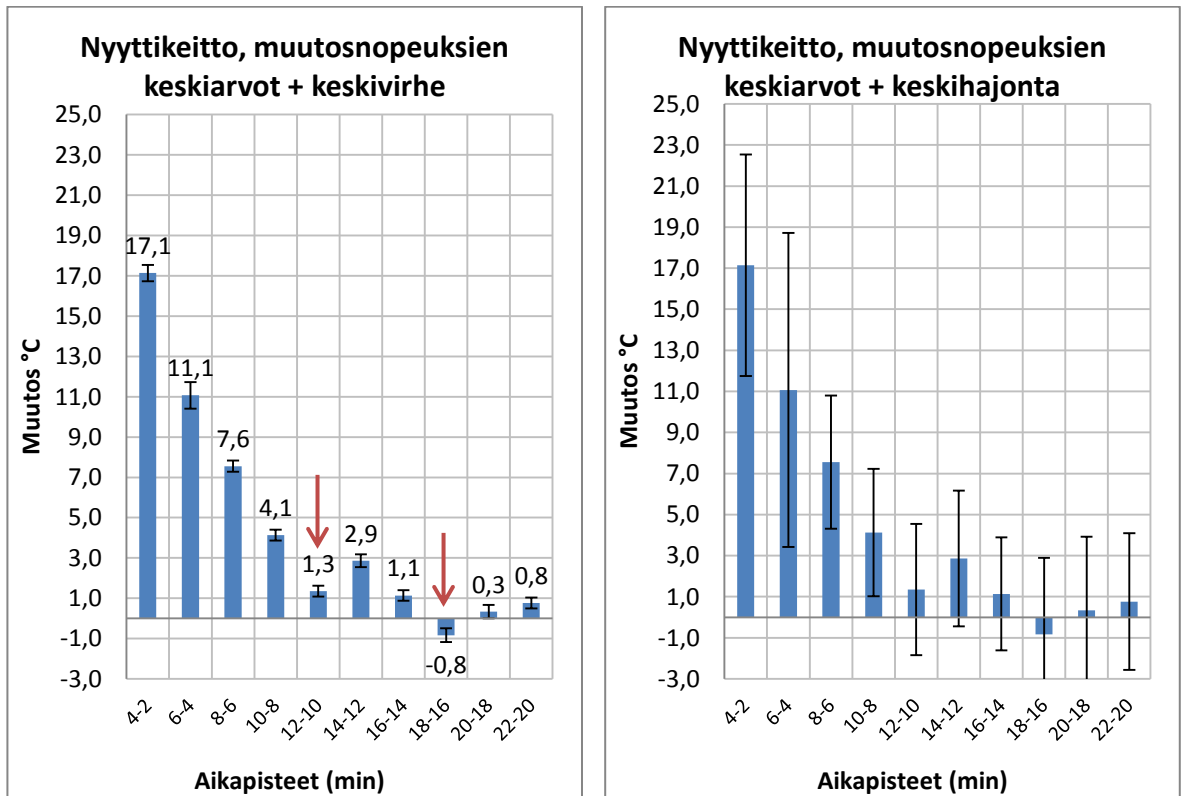
Kuvio 30: Höyrykeiton muutosnopeuksien keskiarvot ja virheet



Kuvio 31: Nyttikeiton lämpötilamuutosten vaihtelut.

Nyttikeitolle kuvattiin myös aikapiste 22 minuuttia, koska sen kypsymisen oletettiin tapahtuman hieman kahta muuta menetelmää jäljessä. Kuviossa 32 näkyy

voimakkaita muutoksia 2 millimetrin reunakerroksessa. Jos sen jättää pois, muutosten hidastumisen kohdat pysyvät samoissa aikapisteissä, mutta lievempinä. Nyyttikeiton lämpötilamuutoksien (Kuvio 31) hidastuminen voidaan nähdä 12 minuutin ja 18 minuutin kohdalla. Tämä erottuu kuitenkin parhaiten keskiarvoista (Kuvio 32). Kuuden minuutin kohdalla näkyvä arvojen vaihtelu on viite siitä, että gelatinoituminen on reunassa meneillään, kun taas keskikohdassa on lämpö vielä voimakkaassa siirtymävaiheessa. (Kuvio 31)



Kuvio 32: Nyyttikeiton muutosnopeuksien keskiarvot ja virheet

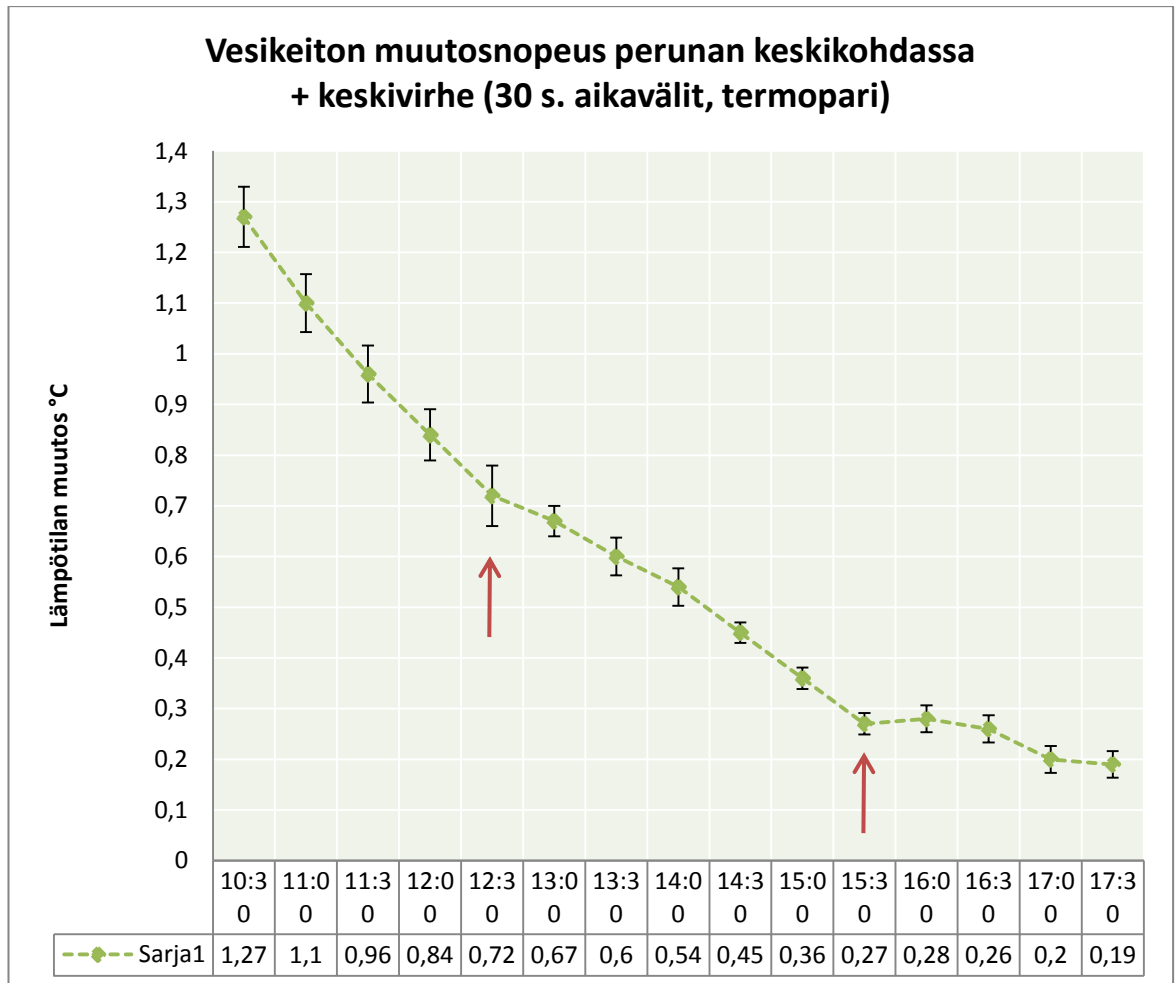
Keittojen lämpötilamuutoksissa 6:n minuutin kohdalla näkyvä lämpötilamuutoksen hidastuminen viittaa lämpötila-alueella 55–70 °C gelatinoitumisen entalpiaan, joka on yksi faasinmuutos, eli kiinteä tärkkelysjuvänen muuttuu geelimassaksi. Myöhemmät lämmön nousun poikkeamat viittaavat korkeiden lämpötilojen vuoksi höyrystymisen entalpiaan. Mittaustilanteessa tapahtuneen jäähtymisen ja vertailuparien satunnaisuuden vuoksi nämä tulokset eivät kuitenkaan ole valideja, mutta antavat aiheen tutkia lisää. (s. 64: Vertailuparien satunnaisuus)

## **Muutosnopeudet termoparimittauksien perusteella**

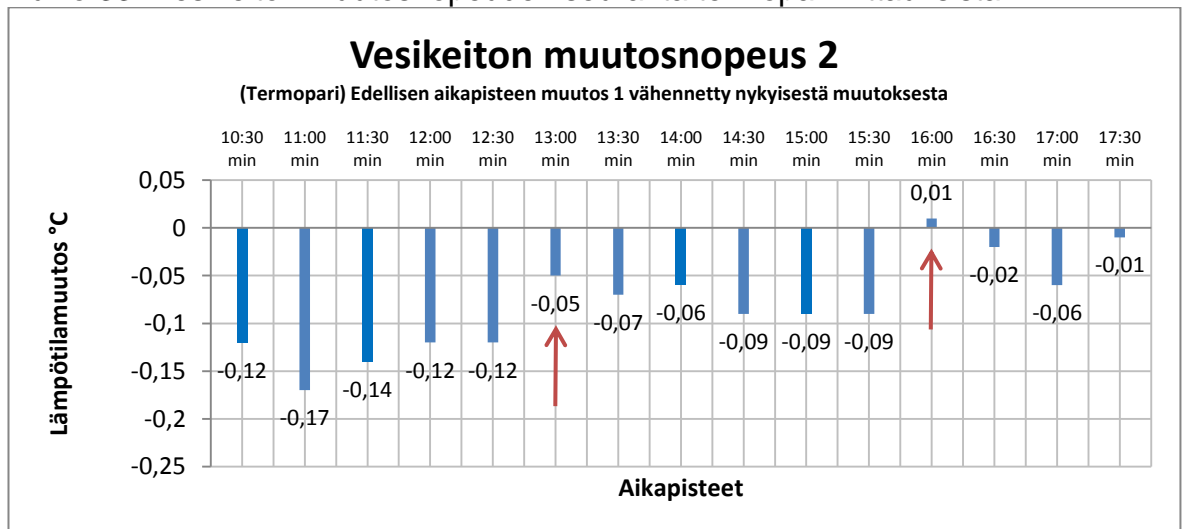
Koska lämpökameramittausten aikaväli oli 2 minuuttia, haettiin faasinmuutoksista tietoa myös termoparimittauksista, joista oli mahdollista valita halutut aikavälit keittovideoilta, joissa on taltioituna keittotapahtumien lämpökameratyöskentely ja termopariarvot. Termoparimittauksien tuloksiin jäähtyminen ei vaikuttanut, koska kaikki keittojen termopariarvot olivat peräisin perunoista, jotka olivat keitossa läpi koko keittosession.

Muutosten jatkoseurannassa päätettiin keskittyä kypsennyksen loppuvaiheeseen. Termoparimittauksista poimittiin muutosseurannat 10–17:30 keittoajoilta puolen minuutin välein. Seurantaan otettiin mukaan 10 keittosessiota jokaiselle keittotavalle, eli toistojen määrä on melko kattava. Termoparimittauksien käytössä etuna on myös se, että keskenään verratut peräkkäiset aikapisteet ovat lähtöisin samasta keitosta ja perunasta, jolloin vertailuparit eivät ole satunnaisia kuten lämpökameratuloksissa. Tuloksissa on kuitenkin otettava huomioon se, että mittauksissa käytetyn termoparin liitoskohta oli osassa keitoista tilapäisesti korjattu, joten sillä saattaa olla tuloksiin vaikutusta.

Ensimmäisessä kuviossa (Kuviot 34,36 ja 38) on muutosten seuranta edellisen seurannan tapaan, eli kaavion arvot ovat kyseisen aikapisteen ja edellisen aikapisteen lämpötilan erotuksia. Toisessa kuviossa (Kuviot 35, 37 ja 39), jossa pylväät ovat pääasiassa akselin alapuolella, arvot ovat aikapisteiden muutosten erotuksia. Toisin sanoen, nykyisen aikapisteen muutos on vähennetty edellisen aikapisteen muutoksesta. Tämän kaavion arvoissa on kiinnitettävä erityisesti huomiota siihen, kun arvot nousevat akselin yläpuolelle tai lähelle nollaa: Tätä edeltävässä aikapisteessä on siis selkeä muutoksen hidastuminen.



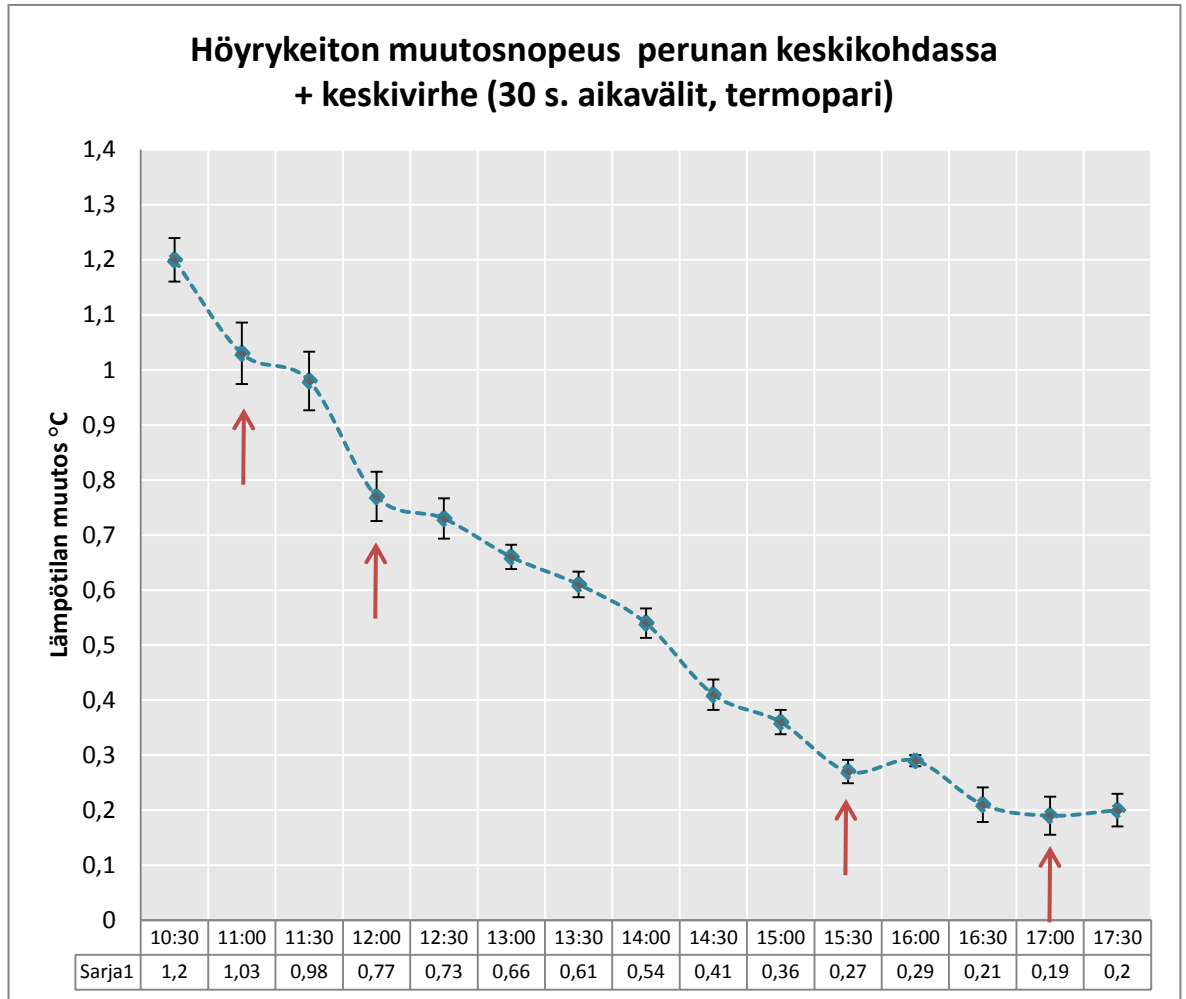
Kuvio 33: Vesikeiton muutosnopeuden seuranta termoparimittauksista



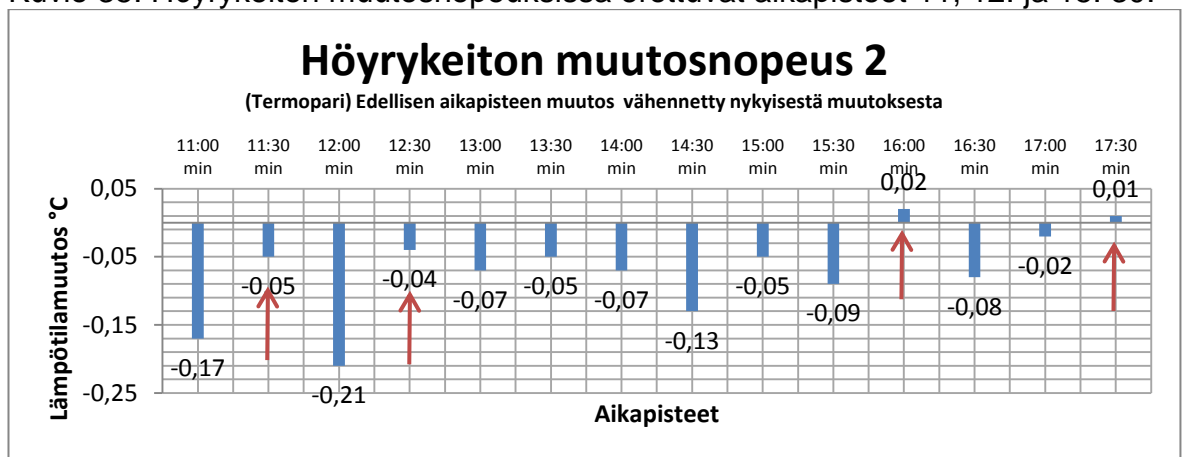
Kuvio 34: Vesikeiton muutosten keskinäinen vertailu. (termopari)

Vesikeitossa selkeä lämpötilamuutoksen hidastuminen on havaittavissa erityisesti ennen 16 minuutin aikapistettä. Ennen 13 minuutin aikapistettä ilmenevä hidastuminen erottuu heikommin.



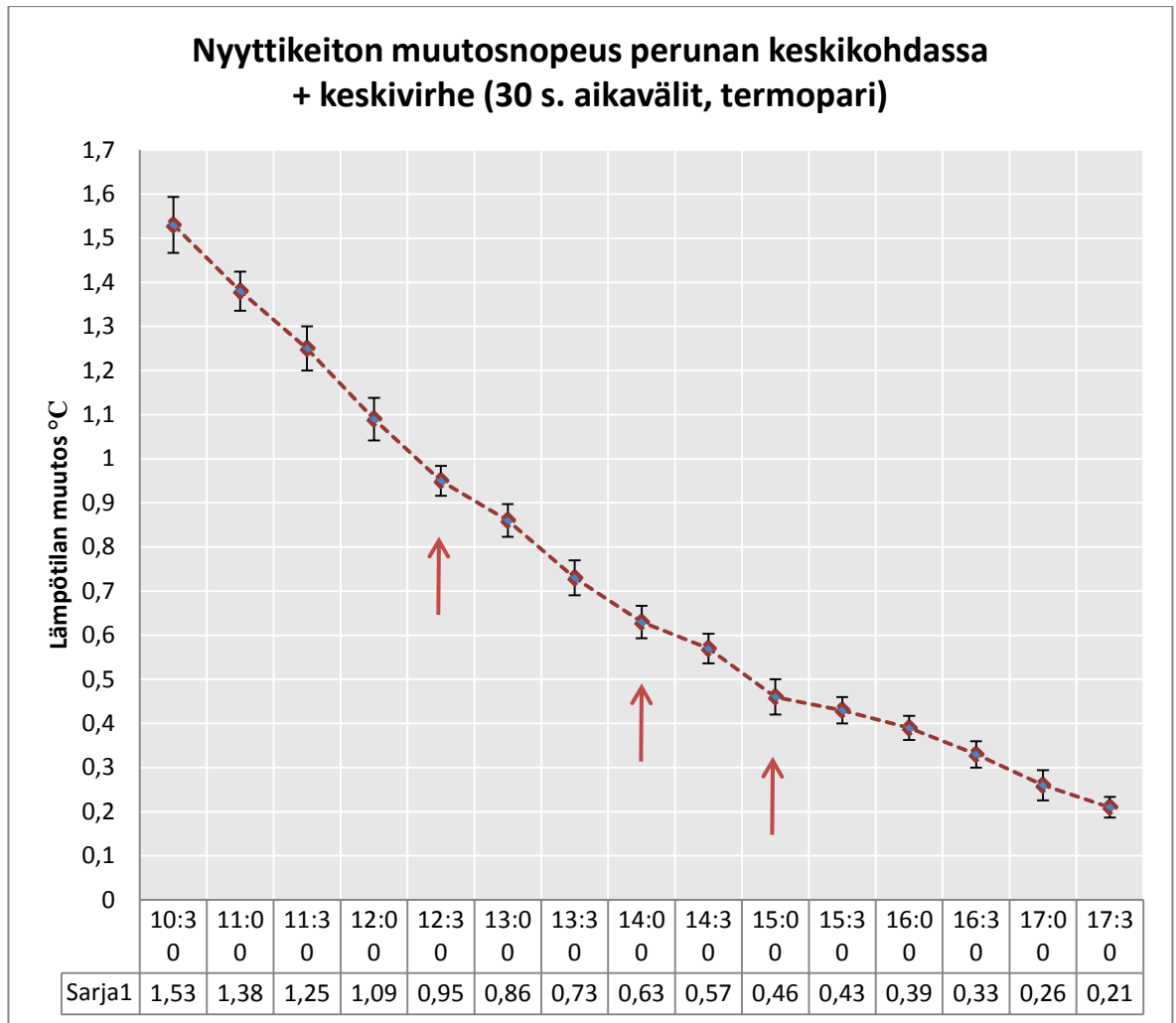


Kuvio 35: Höyrykeiton muutosnopeuksissa erottuvat aikapisteet 11, 12. ja 15: 30.

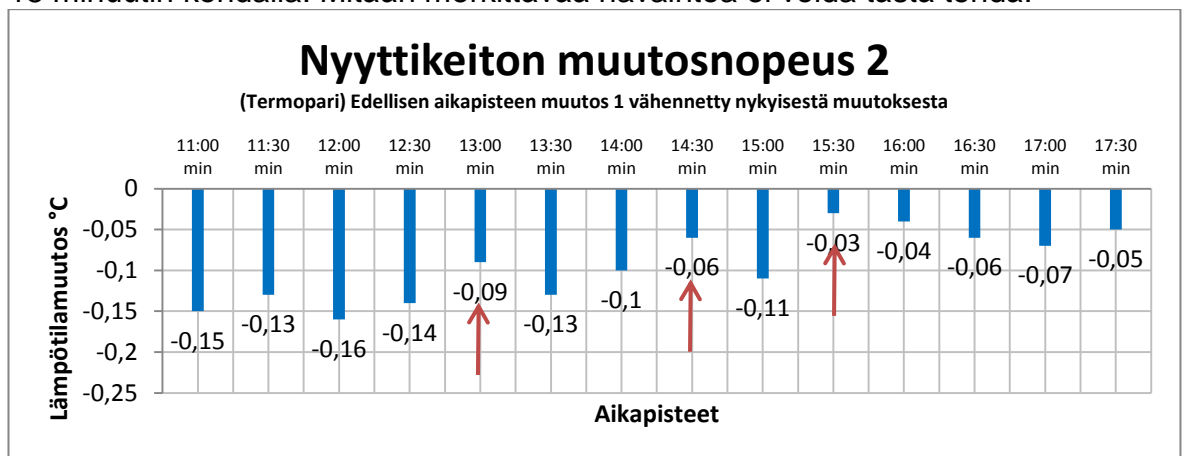


Kuvio 36: Höyrykeiton muutosten keskinäinen vertailu (termopari)

Höyrykeiton lämpötilamuutoksissa selkeät hidastumiset on havaittavissa erityisesti ennen 16 ja 17:30 minuutin aikapisteitä. Myös ennen 11.30 ja 12:30 aikapisteitä on havaittavissa hidastumisia. (Kuvio 35)



Kuvio 37: Nyuttikeiton muutosnopeuksissa näkyy kevyitä hidastumisia 12:30, 14 ja 15 minuutin kohdalla. Mitään merkittävää havaintoa ei voida tästä tehdä.



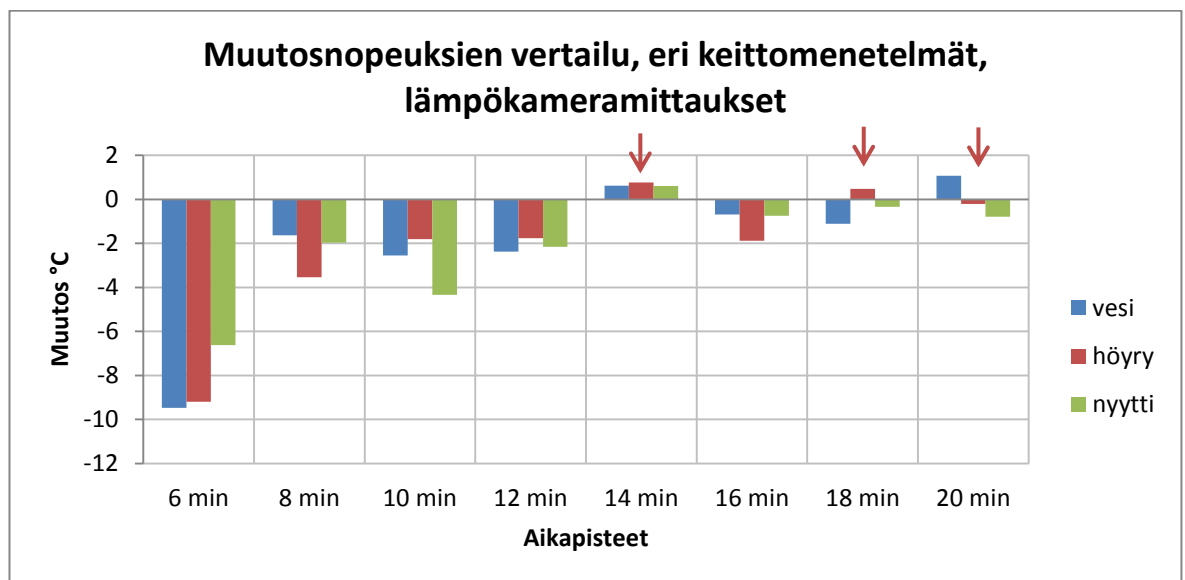
Kuvio 38: Nyuttikeiton muutosten keskinäinen vertailu (termopari)

Nyuttikeiton muutosten keskinäisessä vertailussa ei näy kertaakaan muutoksen palautumista yli akselin, eli lämmön nousun muutoksen hidastuksen arvot ovat

hyvin pieniä. Kevyistä kaavioihin merkatuista muutoksista kaksi ensimmäistä sijoituvat myöhäisempiin ajankohtiin verrattuna vesi- ja höyrykeittoihin.

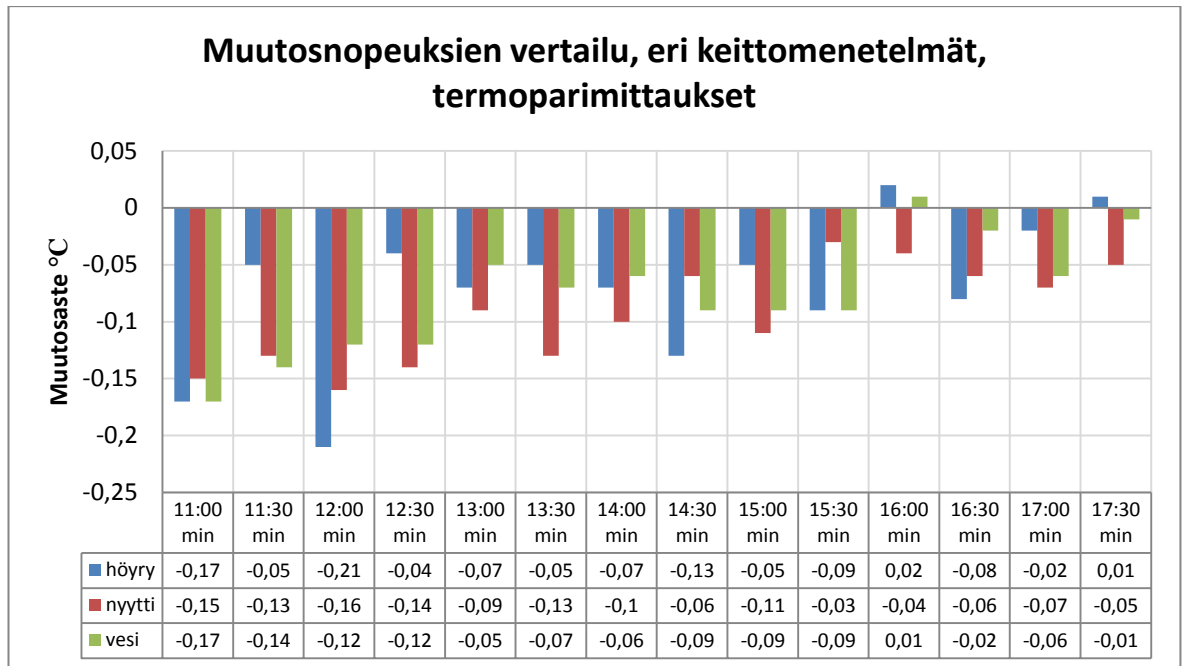
### Muutosnopeuksien yhteenveto

Kun verrataan lämpökameramittauksia ja termoparimittauksia toisiinsa, voidaan tuloksissa havaita samansuuntaisuuksia. Erityisesti, kun otetaan huomioon termoparin sijoitus perunan keskikohtaan, voidaan olettaa termoparitulosten muutospoikkeamien esiintyvän myöhäisemmässä aikapisteessä. Vertailu on kuitenkin vaikeaa, koska lämpökameran aikapisteet ovat 2 minuutin välein, jolloin suurempi aikaväli voi jättää osan muutoksista näkymättömiin. Yleiskuva muutoksista saadaan vertaamalla edellisen aikapisteen muutosta nykyiseen muutokseen.



Kuvio 39: Aikapisteen muutos verrattuna edelliseen. (Lämpökamera)

Lämpökameramittausten perusteella selkeän muutoksen poikkeaman kaikille keittotavoille voidaan todeta olevan ennen 14 minuutin aikapistettä. Lisäksi ennen 18 minuutin aikapistettä muutoksissa esiintyy selkeitä poikkeamia, joista näkyvin on höyrykeitolla. Kokonaisuutena muutosnopeuden hidastumista on todettavissa sekä gelatinoitumisen että höyrystymisen lämpötila-alueilla. Korkeissa lämpötiloissa erottuvat aikapisteet  $\approx 12$  ja  $\approx 16$ . Muutosnopeuden vaihtelut ovat voimakkaimmat höyrykeitetyllä perunalla. Näiden tulosten perusteella voi todeta sen, että mahdollisia faasinmuutospisteitä on, mutta jotta pystyisi tekemään olettamuksen kypsytymisen käännekohdasta, tarvittaisiin lisää mittausdataa.



Kuvio 40: Aikapisteen muutos verrattuna edellisen. (Termopari)

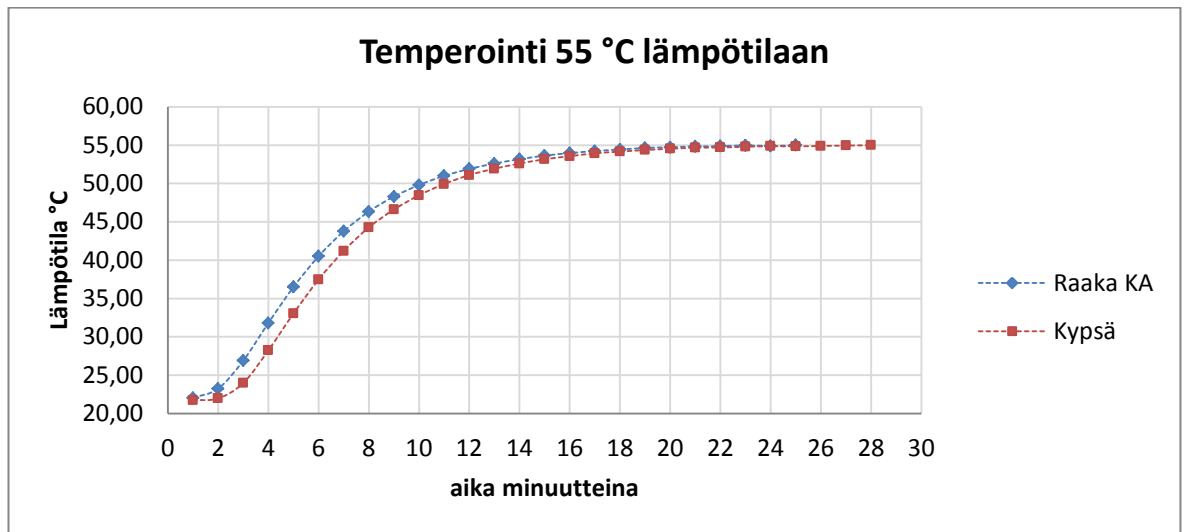
Lämpökameramittauksen pohjalta tehtiin oletus 12 minuutin aikapisteen tienoilla tapahtuvasta ratkaisevasta faasinmuutoksesta, joka samalla olisi kypsytymisen käännekohta. Termoparimittaukset tukevat kuitenkin hieman myöhäisemmän aikapisteen faasinmuutosta, eli alle 16 minuutin aikapistettä. Tämä johtunee osittain siitä, että termoparin mittaama lämpötilatieto on perunan keskikohdasta, jonne lämpötila etenee viimeisenä. Yleisesti poikkeamien erottaminen laskevalta käyrältä on erityisesti voimakkaan lämmön nousun ja sen samanaikaisen hidastumisen aikana vaikeampaa kuin loppuvaiheessa.

### 5.1.3 Kypsän ja ra'an perunan materiaaliominaisuudet

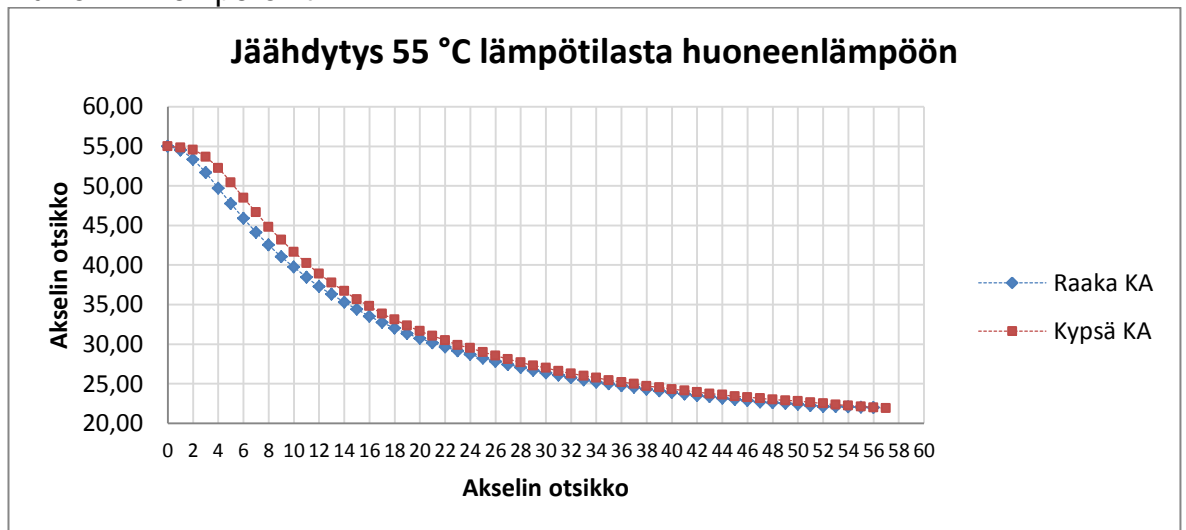
Seuratessa perunan kypsytystä kohtaamme väistämättömän dilemman muuttuvasta materiaalista. Tässä työssä pyrittiin hakemaan viitteitä siitä, miten ra'an ja kypsän perunan lämmönjohtavuudet eroavat toisistaan. Tähän tarkoitukseen temperoitiin lämpökontrolloidussa vesihauteessa sekä raakaa että kypsää perunaa, ja näiden annettiin tämän jälkeen jäähtyä huoneilmassa huoneenlämpöön. Lämpötilat mitattiin termoparilla perunan keskikohdasta, kolmella toistolla molemmista.

Normaalisti kypsä peruna haihduttaa välittömästi kypsytymisen jälkeen runsaasti vettä, ja se kutistuu. Tässä raaka-kypsä vertailussa kypsän perunan haihtumisen

aiheuttama kutistuminen eliminoitui alkuvalmistelussa, jolloin myös kypsä peruna säilytettiin 20 °C vedessä. Kypsä peruna imi tällöin itseensä jonkin verran vettä.



Kuvio 41: Temperointi



Kuvio 42: Jäähdytys

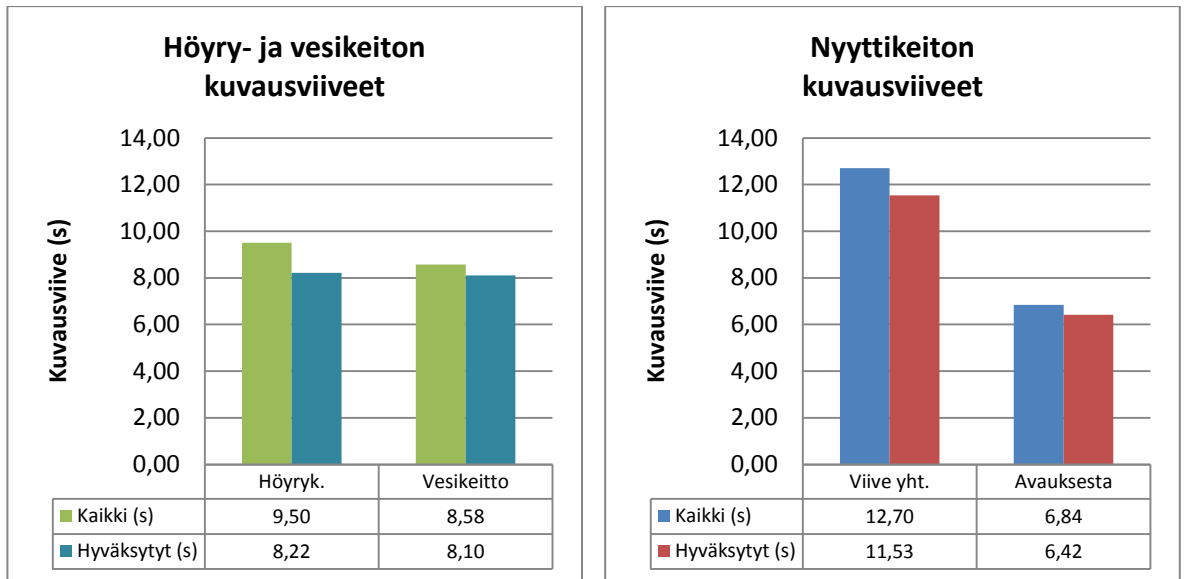
Tuloksista voidaan olettaa raa'an perunan lämmönjohtavuuden olevan hieman parempi sekä temperoinnissa että jäähdytyksessä. Näiden tulosten perusteella myös tehtiin lämmönjohtavuuden laskelmat raa'an ja kypsän perunan jäähdytykselle. Laskelmissa otettiin huomioon huoneilman olosuhteet pinnan konvektiossa. Lähtötietojen pohjalta pystyttiin laskemaan lämmönsiirtotapahtuman Fourierin luvut ja lämpötilagradientit, joiden paraabelin eksponentiaaliselta trendiviivalta haettiin Biotin luvun vakiot. Biotin luvun perusteella tarvittiin enää vain konvektion lämmönsiirtokerroin, jotta lämmönjohtavuus pystyttiin laskemaan. Tulos oli kuitenkin reilusti pienempi lähdetietoon verrattuna. (Lähteen mukainen arvo: 0,55

W/m°C, 40 °C lämpötilassa) (Fellows 2009, 342). Tehtyjä laskelmia ei tässä työssä esitetä, koska laskennassa mukana olevien elementtien muuttuvuus oli liian suuri. Esimerkiksi konvektion lämmönsiirtokerrotimeen vaikuttaa erittäin vahvasti virtauksen määrä. Koska kyseisessä huonetilassa ilmavirtaus oli erittäin pieni, oli myös konvektion lämmönsiirtokerroin pieni. Syytä pieneen arvoon haettiin lisäksi perunan lämpötilan tasoittumiskertoimesta, josta oli käytettävissä vain yksi taulukkoarvo raa'alle perunalle 25 °C lämpötilassa. Jäähdytymisen mittauksissa oli lisäksi yksi muuttuva tekijä, jonka osuutta tuloksiin ei tiedetä: Jäähdytymisen oli kestoltaan lähes tunnin mittainen, minkä kuluessa tapahtunut veden haihtuminen perunan pinnasta todennäköisesti vaikutti tuloksiin.

#### **5.1.4 Lämpökameramittausten jäähdytymisongelma ja virhearvioinnit**

Lämmönsiirto-osion tuloksena saatiin paljon aineistoa, mutta sen käsittely on työlästä erityisesti jäähdytymisen vuoksi. Osa mittausdatasta jouduttiin hylkäämään liian suurten poikkeamien vuoksi. Kuvauskohteen jäähdytymistä voidaan sanoa karkeaksi virheeksi, mikä on lämpökameramittausten kiistämätön ongelma. Tutkimuskohteena ollut pyöreä peruna alkoi jäähdyä ulkopinnasta sillä sekunnilla, kun se nostettiin höyryävän keitosta pois. Tämän jälkeen, kun se halkaistiin, haihtuminen alkoi välittömästi perunan halkaisupinnasta. Kaikkein eniten ehtivät jäähdyä halkaistun perunan ohuimmat reunaosat.

Suurin vaikuttava tekijä lämpökamerakuvauksen jäähdytymisessä on kuvausviive keitosta poiston ja kuvan ottamisen välillä. Kuvausviiveet on dokumentoitu keittovideoiden perusteella, joista saatiin vahvistus kuvan hyväksymiselle tai hylkäämiselle. Kun lämpösuora todettiin poikkeavan muista, kuvan ottamistilanne ja viiveet tarkistettiin videolta.

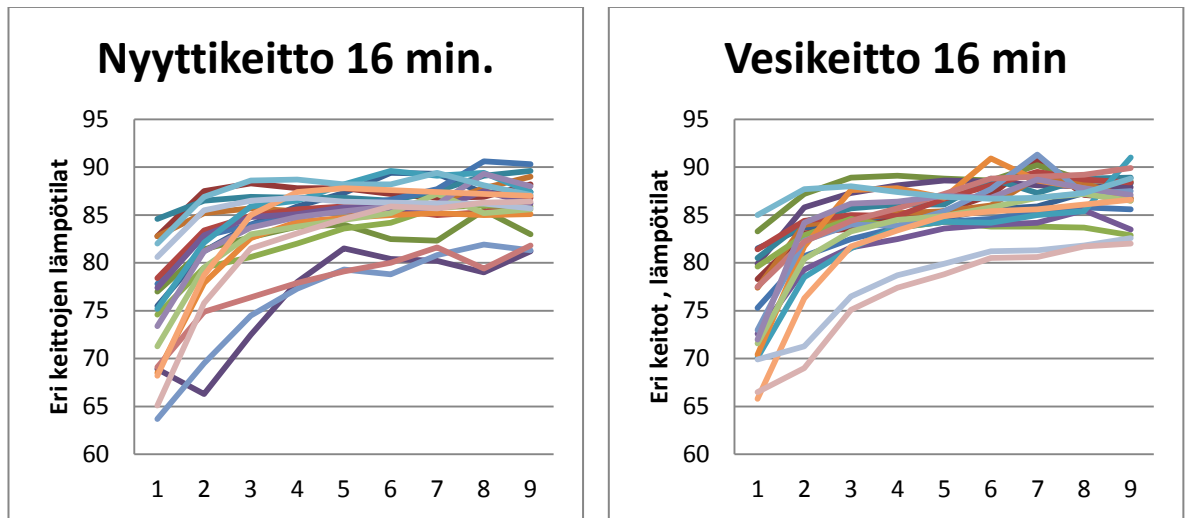


Kuvio 43: Keittojen kuvausviiveet.

Lopullisiin tuloksiin on hyväksytty ne lämpökuvat, joiden kuvausviive vesi- ja höyrykeiton osalta alittaa 10 sekuntia, jolloin keskimääräinen kuvausviive on 8 sekuntia. Nyuttikeiton lämpökuvista on hyväksytty alle 14 sekunnin kokonaisviive, ja maksimissaan 7 sekunnin kuvausviive nyttin avauksen jälkeen.

Höyry- ja vesikeiton kuvaustapahtumat olivat samankaltaisia, joten nämä olivat suoraan vertailukelpoisia keskenään. Nyuttikeiton kuvausviive on väistämättä pidempi, koska nyttipaperin avaus oli yksi lisätyövaihe ennen kuvausta. Tuloksissa lähdettiin kuitenkin siitä oletuksesta, että koska ruoanlaittopaperi suojaa perunaa ennen paperin poistoa, ei pidempi kuvausviive kuitenkaan käytännössä tuota merkittävää eroa verrattuna höyry- ja vesikeiton jäähtymistuloksiin.

Kuviossa 44 on yleiskatsaus 16 minuutin keittojen lämpösuorista. Näistä voidaan heti ensi silmäyksellä huomata, mitkä poikkeavat massasta ja on hylättävä.



Kuvio 44: Kokonaisnäkymät Vesi- ja nyyttikeittojen 16 minuutin lämpösuorista

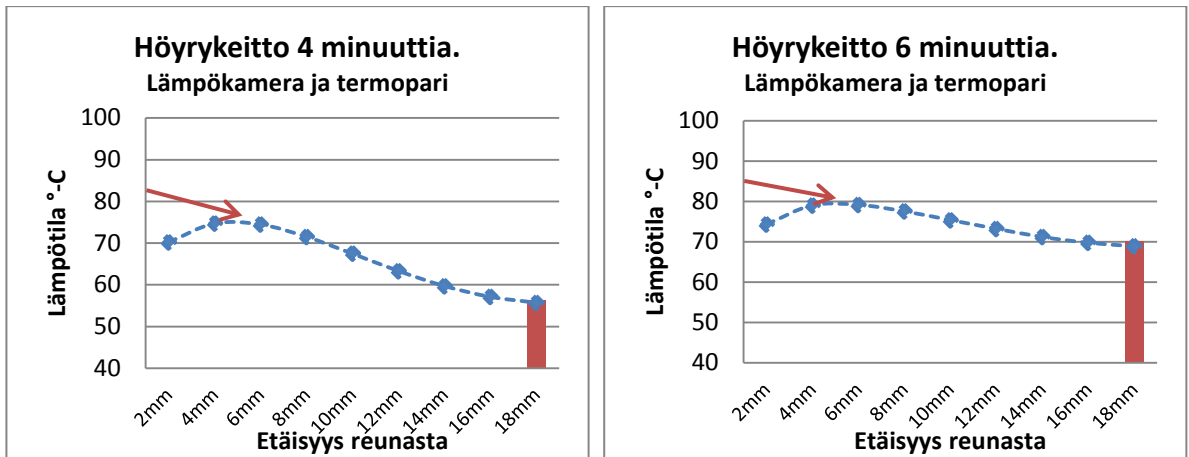
Jäähtymisen vaikutusta mitattuihin lämpötila-arvoihin voidaan arvioida monella tapaa:

- Vertaamalla lämpökameran antamia arvoja termoparin mittaustuloksiin.
- Vertaamalla kahta peräkkäistä lämpökuvaa, joiden kuvausten aikaväli ja kuvausviiveet ovat tiedossa.
- Lämpötila voidaan laskennallisesti arvioida höyrystymisen aiheuttaman lämpöhävikin kautta, kun tiedetään mittausolosuhteet kuten huoneen lämpötila, kosteus ja mittausviive. Tähän ei tässä työssä kuitenkaan ollut resursseja.

### Lämpökameran arvojen vertailu termoparin avulla

Seuraavana on esimerkki höyrykeiton lämpökameralla mitattujen lämpötilojen tulokinnasta. Matalissa lämpötiloissa (Kuvio 45) mitatut lämpötilat ovat lähellä oikeaa, korkeammassa ne ovat ulkoreunassa saavuttaneet tasapainotilan ympäröivän veden tai höyryn kanssa, ja todellinen lämpötila on karkeasti arvioiden lineaarisella suoralla siitä kohti termoparin mittaamaa arvoa.



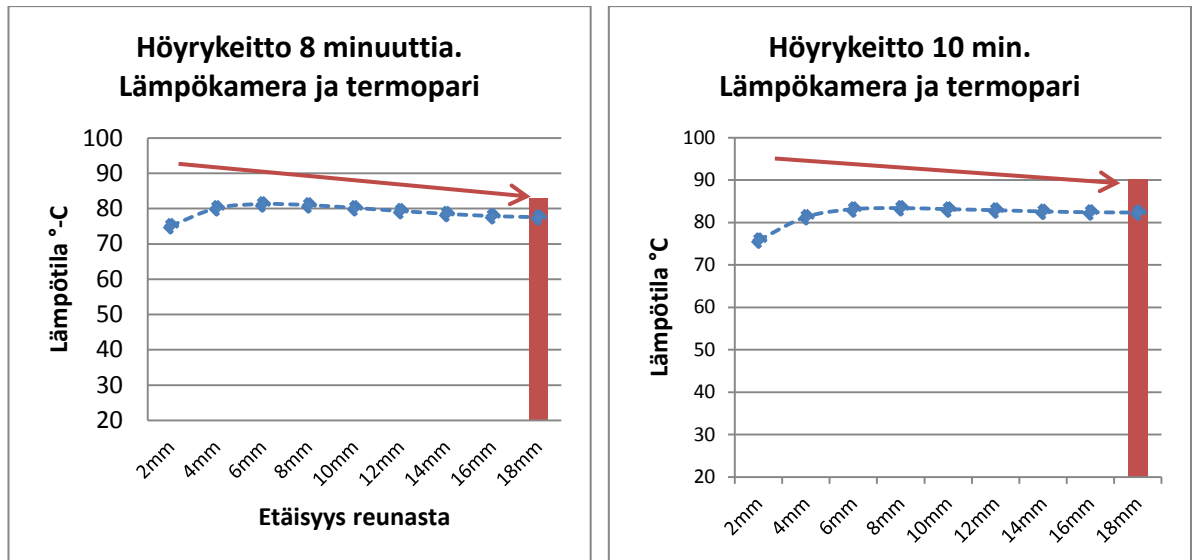


Kuvio 45: Neljän ja kuuden minuutin höyrykeittojen vertailu eri mittalaitteiden tulosten kesken.

Taulukko 5: Mittauserot keskikohdassa lämpökameran ja termoparin välillä.

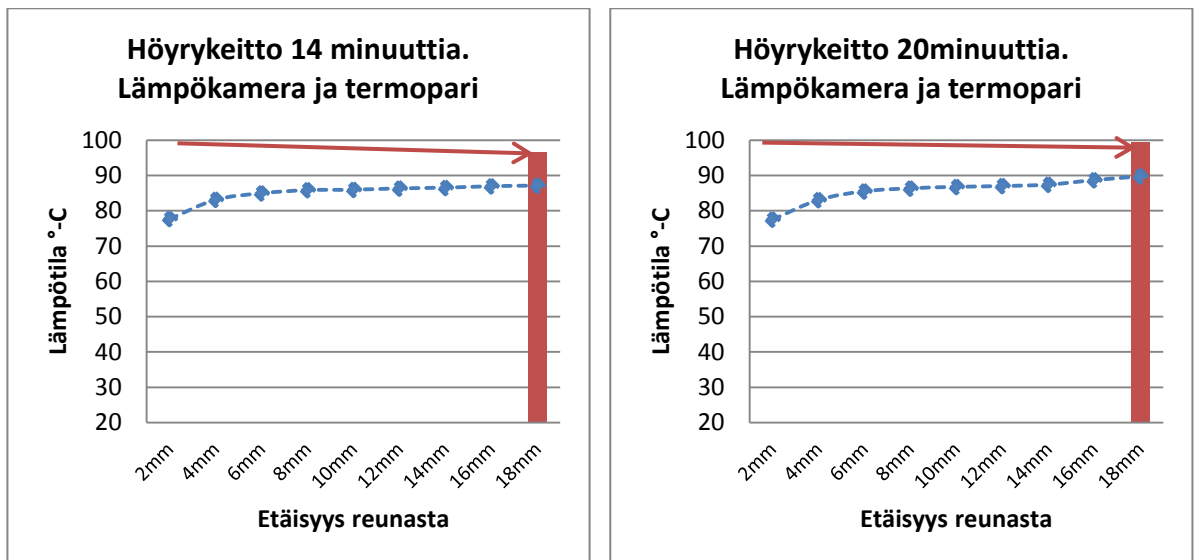
	Nyytti	Vesi	Höyry
2 min	-13,57 %	-12,84 %	-4,16 %
4 min	0,26 %	-0,25 %	0,89 %
6 min	-0,43 %	2,85 %	1,74 %
8 min	4,62 %	7,67 %	6,96 %
10 min	9,03 %	9,59 %	9,53 %
12 min	11,71 %	11,79 %	11,75 %
14 min	11,22 %	11,58 %	11,03 %
16 min	12,35 %	11,52 %	13,11 %
18 min	12,94 %	11,78 %	11,56 %
20 min	12,66 %	11,84 %	10,86 %

Kun keskikohdan lämpötilojen mittauseroja termoparin ja lämpökameran välillä eri keitoissa verrataan, voidaan suurimmat erot havaita yli 10 minuutin keittojen jälkeen (Taulukko 5). Kahden minuutin keitossa voidaan havaita, että termoparin mittaama arvo on pienempi kuin lämpökameran mittaama arvo. On mahdollista että tämä johtuu lämmön nousun suuresta nopeudesta keiton alkuvaiheessa. Näin ollen lämpö ehtii edetä noina muutamina sekunteina ennen kuvausta.



Kuvio 46: 8:n ja 10:n minuutin keittojen lämpötilavertailut mittalaitteiden kesken

Korkeammissa lämpötiloissa perunan ja ympäröivän veden tai höyryn lämpötilaerot ovat pienemmät ja lämmön nousu on hitaampaa, jolloin lämmön etenemistä kuvausviiveen aikana ei enää tapahdu niin nopeasti, vaan ongelmana on lämmön haihtuminen. (Kuvio 46 ja Kuvio 47)



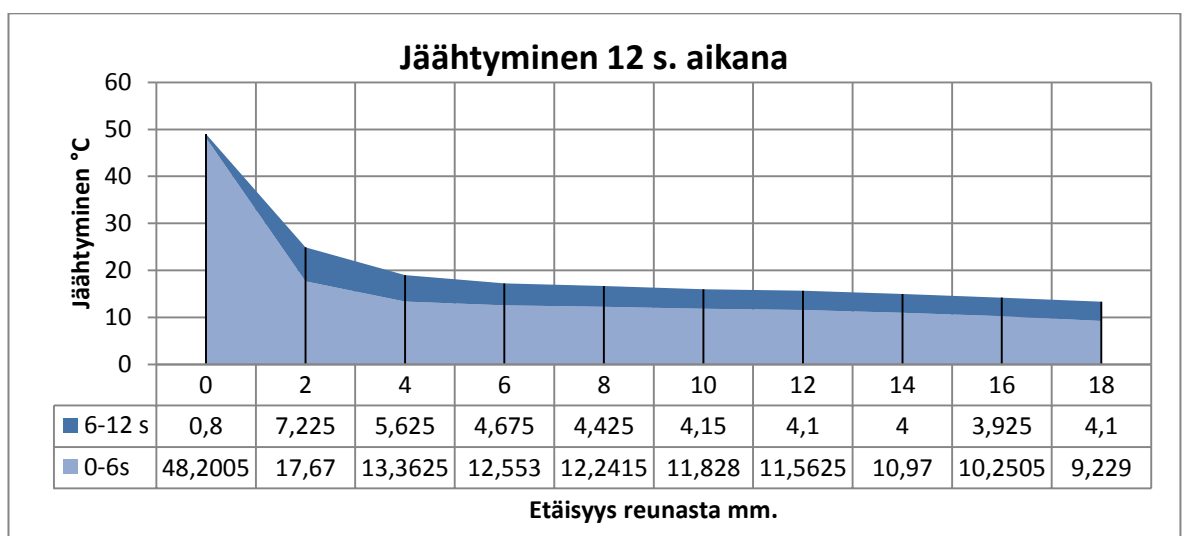
Kuvio 47: 14:n ja 20:n minuutin keittojen lämpötilavertailut mittalaitteiden kesken

## Kahden peräkkäisen lämpökuvan vertailu

Termoparin antamasta lämpötilatiedosta voidaan tehdä oletus, että välittömästi reunan lähellä olevia alueita lukuun ottamatta perunan sisäosat ovat jäähtyneet samassa tahdissa. Näin ollen, lämpötilaeroja perunan sisällä voidaan verrata toisiinsa ja eri mittauksien lämpötilaeroja keskenään, vaikka jäähtymistä olisikin tapahtunut. Tätä oletusta tukee Kuvio 48: Jäähtymisen eteneminen 12 sekunnin aikana.

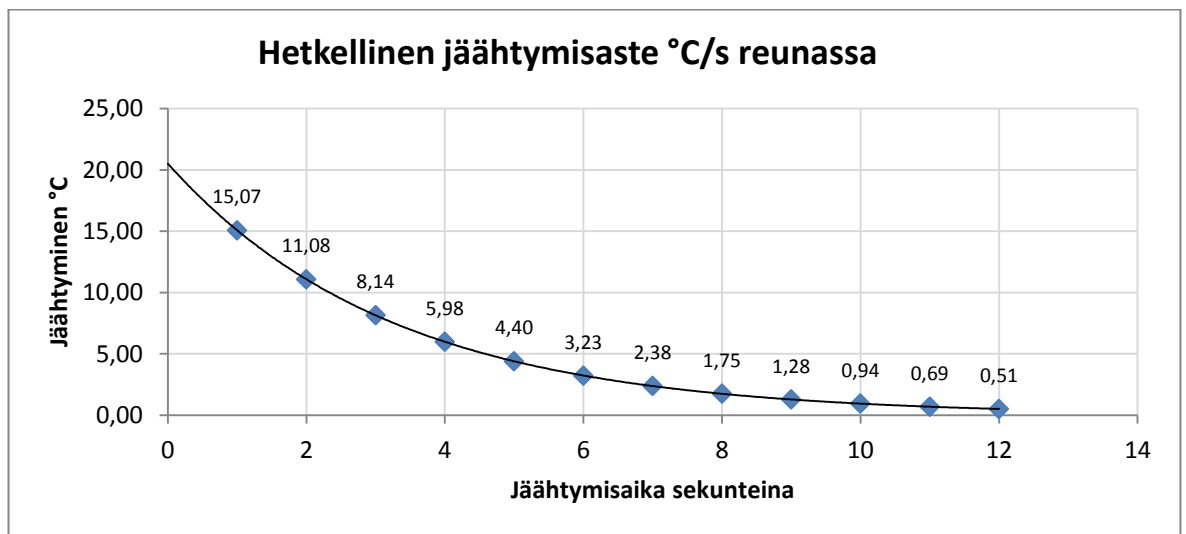
Pelkkää termopari- ja lämpökameratulosten vertailua jalostuneempi versio jäähtymisen määristä on verrata samasta kohteesta kuvattua ensimmäistä ja toista lämpökuvaa keskenään. Tällöin vertailun lisätiedoiksi otetaan termoparitiedot ja videolta tarkistettut viipymäajat. Näiden perusteella on tehty esimerkkivertailu 12 minuutin höyrykeitolle (kuviot 48 - 50), johon valittiin 4 otosta. Näissä kaikissa viiveet olivat 6 sekuntia ennen ensimmäistä kuvaa, ja ennen toista kuvaa 6 sekuntia, eli yhteensä aikajanaa kertyy 12 s.

Jäähtyminen on nopeinta heti keitosta poiston jälkeen (Kuvio 48). Kuviossa on esitetty 12 minuuttia höyryssä keitetyn perunan jäähtyminen siitä hetkestä alkaen kun se on otettu pois keitosta. Vaaleampi alue esittää jäähtymistä 6 sekunnin aikana ennen ensimmäistä lämpökuvaa. Tummempi alue kuvaa jäähtymistä ennen toisen lämpökuvan ottamista.

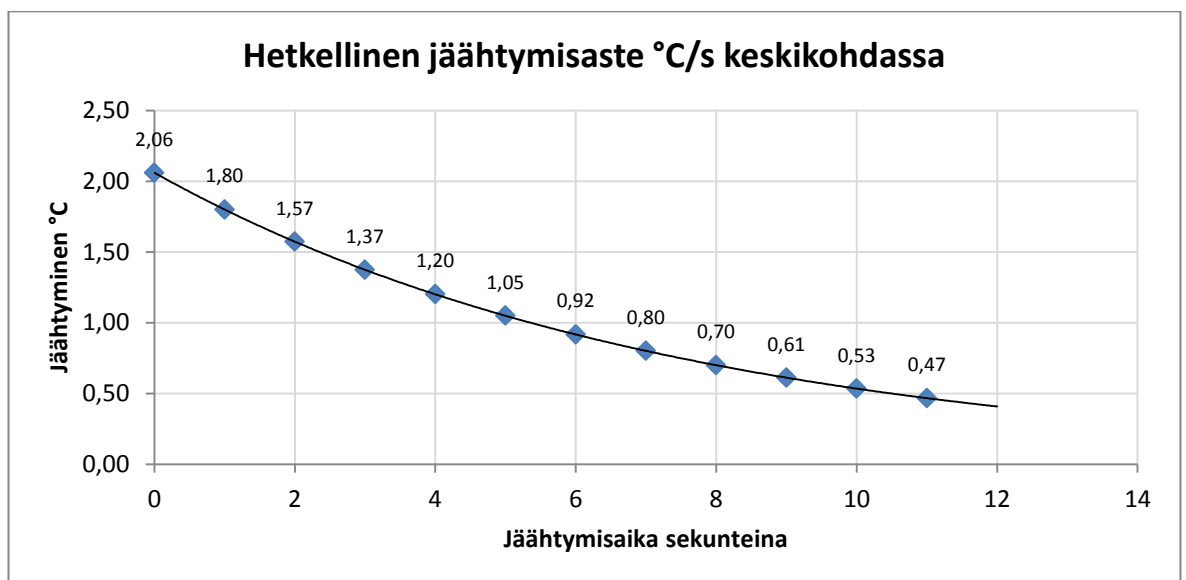


Kuvio 48: Jäähtymisen eteneminen 12 sekunnin aikana

Jäähtyminen on reunassa suurempaa kuin keskellä, koska perunan pinta on pidemmän aikaa alttiina huoneenlämmölle. Jäähtyminen hidastuu asteittain. Arvioitaessa jäähtymisen määrää valitulla hetkellä, lasketaan kumuloiduvasti kaikki siihen mennessä kertyneet jäähtymisen määrät yhteen. Reunassa kumuloidunut jäähtymisen aste on 12 sekunnin kuluttua noin 48 °C (Kuvio 49). Perunan keskikohdassa jäähtyminen kumuloiduu 12 sekunnin aikana yhteensä noin 13 °C (Kuvio 50).



Kuvio 49. Jäähtymisen hetkellinen aste reunassa



Kuvio 50. Jäähtyminen perunan keskikohdassa 12 sekunnin aikana

Tämän arvioinnin mahdollisuudet rajautuvat alkujäähtymisen osalta, eli ennen ensimmäistä lämpökuvaa pelkkiin reuna- ja keskikohdan lämpötilatietoihin. Alkutilanteen keskikohdan lämpötila on termoparin mittaama tieto, ja reunan lämpötila on oletus siitä, että 12 minuutin kuluttua reunassa on saavutettu tasapainotila ympäröivän fluidin kanssa.

### **Muut virhearvioinnit**

Yksi muutostekijä, joka lämmönsiirron mittauksissa tuli esille, oli perunoiden käsittelyn ja säilöntäliuoksen viikon kuluessa aiheuttama rakennemuutos perunan pinnassa. Mitä tämä aiheutti lämmön siirtymiselle, jäi arvoitukseksi. Raa'an ja kypsän perunan lämmönjohtavuuden vertailun olisi voinut toteuttaa toisinkin. Mittauksessa olevan kypsän perunan vesipitoisuus tulisi määrittää, jolloin tuloksia voisi suhteuttaa paremmin. Myös haihtuminen jäähtymisvaiheessa oli muutostekijä, joka vaikutti tuloksiin. Muuta virhetarkkailua on tehty tulosten esittämisen yhteydessä, jossa on pääasiallisesti esitetty keskiarvon keskivirhe, ja erikseen mainittuna myös keskiahajonta.

#### **5.1.5 Lämmönsiirto-osion johtopäätökset**

Lämpökamera todettiin lämmönsiirron tutkimisessa toisaalta erinomaiseksi työkaluksi, toisaalta haastavaksi käyttää nopeasti jäähtyvän materiaalin vuoksi. Jäähtymisen minimoimiseksi tulisi tehdä vielä lisää kehitystyötä. Tuloksien laatuun auttaisi paljon, jos jäähtymisviive olisi joka kuvalla sama. Näin ollen kuvausmenettely tulisi rytmittää robottimaiseksi säännönmukaiseksi työskentelyksi. Myös parityökentely nopeuttaa lämpökuvausta. Termoparimittaukset olivat välttämätön vertailuelementti, joita ilman ei tuloksia voisi suhteuttaa todellisiin lämpötiloihin.

Jos jäähtyminen pystyttäisiin minimoimaan ja vakioimaan, voisi mittaustuloksille laskea korjaavat kertoimet hieman edellisen kappaleen hetkellisten jäähtymisasteiden kertoimen tapaan. Tällöin tietenkin tulisi huomioida myös tilan lämpötila ja kosteus. Toistuvien keittojen vuoksi huonetilan olosuhteet kuitenkin muuttuvat väistämättä.

Tutkimustyössä ilmenee helposti yllättäviä tarkistustarpeita, jotka yleensä joudutaan tekemään uusintamittauksina. Lämpömittausten videoinnista on paljon hyötyä, koska niistä saa paljon tietoa irti myös jälkeenpäin. Videon pohjalta saa tietoa erityisesti kuvausviiveestä, ja mittaritiedot voi tarkistaa mistä hetkestä tahansa. Videotaltion avulla ei siis välttämättä tarvitse myöhemmin kohdata tutkimusmateriaalin saatavuusongelmaa.

Lämmönsiirto-osion pohjalta heräsi paljon kysymyksiä kypsymisen käännekohdasta, minkä vuoksi jatkoseurantaan valittiin olennaiset muutosten aikapisteet. Rakennemittaukseen valittiin erityisesti kypsymistapahtuma, joihin otettiin mukaan 10, 12, 14 ja 16 minuutin aikapisteet. Näistä 10 minuutin aikapiste toimi vertailuna oletetulle 12 minuutin faasinmuutokselle, ja näistä seuraavat 14 ja 16 olivat myöhempiä vertailupisteitä. Mikäli 12 minuuttia olisi kypsymisen käännekohta, sitä seuraavat aikapisteiden tulisi osoittaa perunan olevan kypsää.

Mikroskopointia varten otettiin seurantaan lisäksi myös 4 ja 6 minuutin aikapisteet, jolloin lämpötila liikkuu gelatinoitumisalueella. Lisäksi mikroskoopille otettiin aikapisteet 12, 14 ja 16 minuuttia erityisesti kypsymisvaiheen toteamista varten. Kymmenen minuutin aikapiste jätettiin pois, koska mikroskopoinnissa ei ole välttämättä käyttöä vertailupareja samaan tapaan kuin rakenne- ja lämpömittauksissa.

## 5.2 Mikroskooppikuvausten tulokset

Tämän työn puitteissa on koottu mikroskooppikuvien kuvasto kolmen eri keittotavan kypsymisvaiheista. Kuvien yhteyteen on tallennettu tieto keittoajasta ja etäisyydestä reunasta käsin. Tavoitteena oli, että kuvat olisi otettu samoista pisteistä kuin lämpö- ja rakennedata, jotta lämpö- ja rakennemittausten materiaali olisi suoraan verrattavissa mikroskooppikuviin. Kuvien ottaminen juuri täsmälleen halutusta kohdasta leikettä ei aina onnistunut, vaan kuva täytyi ottaa aina, kun selkeä näkyvä onnistuttiin saamaan. Lisäksi, tietyt olennaiset muutokset, kuten gelatinoitumisraja täytyi huomioida kuvaotteissa. Tämän vuoksi kaikki otteet eivät ole nimenomaan 2 millin väleiltä. Jotta tarkka otos halutuista mittapisteistä saataisiin aikaan, täytyisi materiaalia olla runsaasti.

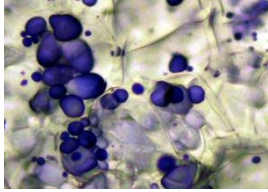
### 5.2.1 Mikroskooppikuvien tulkinta

Perunaleikkeiden mikroskooppikuvien tulkinta on haastavaa, koska jokainen kuva on erilainen. Perunan kypsennysvaiheen mikroskooppikuville ei varsinaisesti löytynyt lähdeaineistoa, johon tutkimuksen kuvamateriaalia olisi voinut verrata. Aina ei näin ollen ole mahdollista selittää kuvan näkymää yksiselitteisesti. Jodivärjäyksen avulla pystyy toki erottamaan paremmin erilaisia yksityiskohtia, kuten purppuranpunaiset tai violetit tärkkelysjyväset. Koska jodi värjää erityisesti amyloosin tumman siniseksi, toimii vapaa amyloosi värripintana, joka parhaassa tapauksessa tuo kuvaan kontrastia.

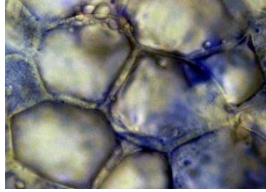
Koska viiteaineistoa ei ole käsillä, paras tapa tulkita perunan kypsyttä johdonmukaisesti mikroskooppikuvista on luoda kuvarekisteri, jossa eri kypsymisvaiheet on dokumentoitu. Erilaisista näkymistä koostuva rekisteri tulisi kuitenkin käydä läpi asiantuntijoiden kanssa, jotta tulkinnat tulisi tehtyä oikein. Seuraavana on esimerkkikuvia erilaisista näkymistä, joita on pyritty tulkitsemaan itsenäisesti. Tämän osion tulokset ovat objektiivisuuteen pyrkiviä subjektiivisia havaintoja.

Taulukossa 6 on esimerkkejä mikroskooppikuvien tulkinnoista keiton alkuvaiheista, jolloin näkymät ovat hyvin vaihtelevia. Kuvissa näkyy ehjiä tärkkelysjyväsiä ja jyväsiä purkautuneen amyloosin siniseksi värjäämiä alueita. Soluseinät erottuvat vahvoina, ja muuntautuva tärkkelys muodostaa epämääräisiä kuvioita.

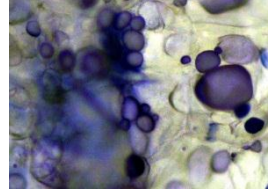
Taulukko 6: Tulkintoja keiton alkuvaiheen mikroskooppikuvista. (minuutti/mm)



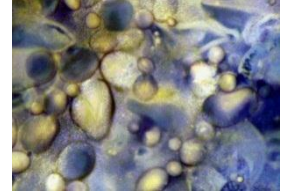
Tuoreen perunan solukkoa ja intakteja tärkkelysjiyväsiä. (0)



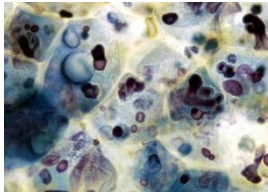
Solukon pintaa, vahvat soluseinät (4/10)



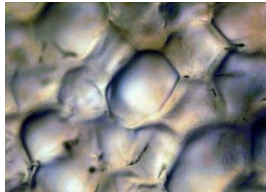
Osittain turvonneita tärkkelysjiyväsiä ja amyloosin tahrinmaa solukkoa (4/10)



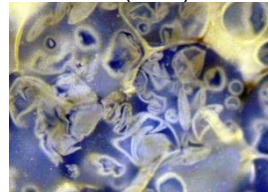
Osittain turvonneita tärkkelysjiyväsiä ja amyloosin tahrinmaa solukkoa. (4/10)



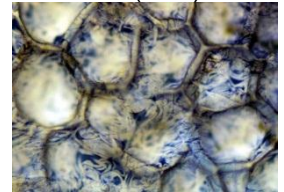
Nyuttikeitto, 6/14, gelatinoituvia tärkkelysjiyväsiä.



Solukon pintaa, kun jodi on haihtunut (4/4)



Gelatinoituvaa "lehtimäistä" tärkkelystä solukon pinnalla.(6/13)



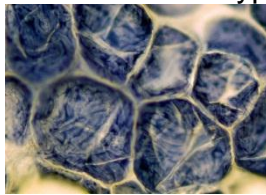
Keiton alkuvaihe: Vahvat soluseinät, tärkkelys gelatinoitunut.(6/10)

Kun testiperunaa on keitetty 12 minuuttia, erityisesti perunan keskiosien mikroskooppitoksissa voidaan edelleen todeta merkkejä siitä että peruna ei ole täysin kypsää (Taulukko 7). Solukon pinnalla näkyy paikoitellen rikkonaista rakennetta, soluseinät erottuvat, ja jopa ehjiä tärkkelysjiyväsiä saattaa löytyä. Solukon pinnalla näkyy rikkonaisia solurakenteita, ja ehjää solukkoa ei aina voida erottaa näiden alta. Rikkonaisuus on ilmiö, joka vähenee kypsymisen myötä.

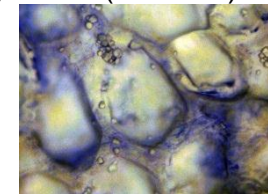
Taulukko 7: Erilaisia vaiheita ennen kypsymistä. (min/mm)



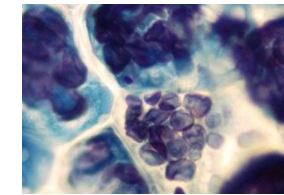
Rikkonaista solukkoa perunan keskeltä (12/18)



Tiukasti toisissaan kiinni olevaa solukkoa. (12/10)



Nyuttikeitto (12/14), pinnalla gelatinoitumattonta tärkkelystä.



Gelatinoitumatta jääneitä luhistuneita tärkkelysjiyväsiä. Höyry (14/18)

Kypsyessään perunan solut alkavat irtautua toisistaan, ja jos tärkkelystä on soluisa runsaasti, solujen muoto pyöristyy (Damodaran;Parkin ja Fennema 2008, 126-127). Taulukossa 8 on esimerkkilotoksia kypsästä perunasta. Solukko erottuu selkeästi, eli solujen pinnalla ei ole ylimääräistä sotkevaa tärkkelysliisteriä, eikä rikkonaisia solun- tai tärkkelysjiyväsen rakenteita. Kypsässä perunassa voi nähdä solu-

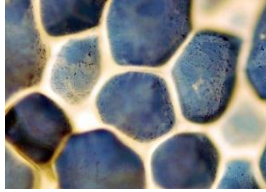


jen täyttyneen tärkkelyksen muodostamista rihmamaisista kuvioista. Solut ovat joko ahtaasti toisissaan kiinni, tai pyörityneitä ja irtonaisia.

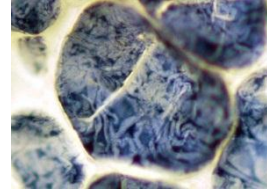
Taulukko 8: Kypsymisen merkkejä.



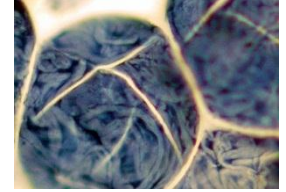
Nyyttikeitto (14/2), solut hieman irtonaisia reunassa.



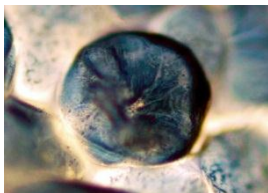
Kypsää solukkoa, enemmän kosteutta, solujen välillä väljyyttä.(16/2)



Kypsää solukkoa, hieman väljyyttä. (16/8)



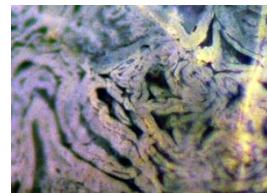
Ehjä solu, jonka sisällä turvonneita tärkkelysjiä. Valkoinen viiva: Solun kuoren taite. (16/4)



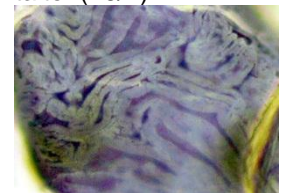
Pyöritynyt irtautunut solu (16/2)



Kypsää turvonnutta solukkoa ahtaasti toisissaan kiinni.(30/x)



Yksityiskohta kypsän solun sisältä: Tärkkelysrihmastoa. (30/x)

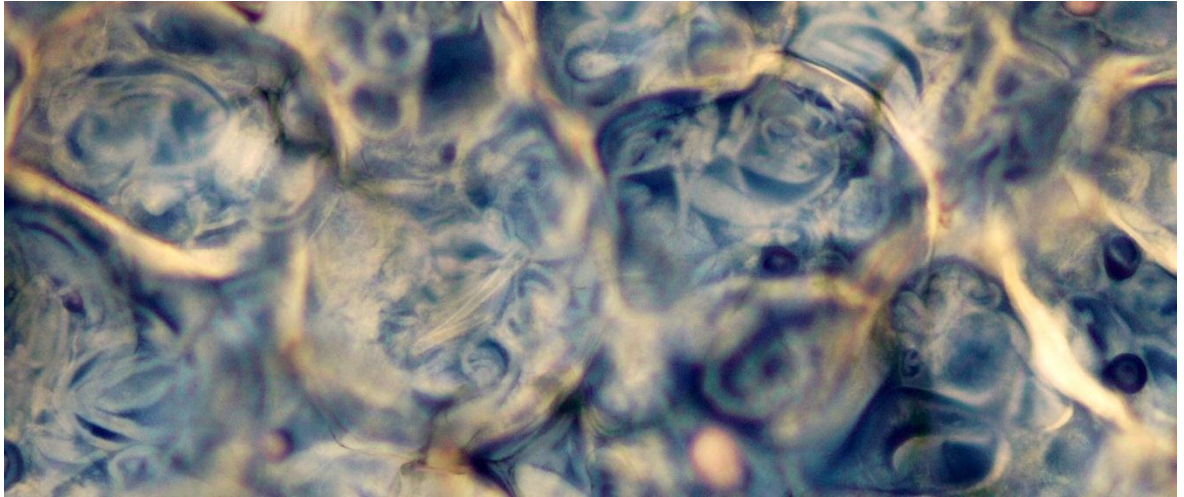


Yksityiskohta kypsän solun sisältä (30/x)

Kuvaustyön tuoman kokemuksen ja lähdetietojen pohjalta on taulukkoon 10 koottu yhteenvetona muutamia perunan kypsyysasteen yksityiskohtia. Tämä tulkinta on kuitenkin vahvistamaton.

Taulukko 9: Perunan kypsyysasteen tunnusmerkkejä mikroskooppikuvissa.

Raaka	Välivaihe	Kypsä
Ehjä tärkkelysjiä	Tahraavaa, siniseksi värjäytynyttä amyloosia	Muhkeaksi turvonnutta tärkkelysrihmastoa solun sisällä
Kirkkaat, läpikuultavat solut	Sameus/sotkuisuus	Läpikuultavuus palautuu osittain
Jodi värjää vain tärkkelysjiä	Kiinteät solun välilamellit, vahvat, erottuvat soluseinät	Pyörityneet, irtonaiset solut tai ahtaasti toisissaan kiinni olevat solut, soluseiniä ei juuri havaitse
	Puoliksi hajonneita tärkkelysjiä, muodostavat lehtimäisiä kuvioita	Tärkkelysjiä muodostavat rihmamaisia kuvioita.
	Rikkonaisia soluseinien rakenteita	Tahraavaa vapaata amyloosia ei enää näy, kontrastit ovat selkeät.



Kuvio 51: Neljän minuutin höyrykeitto, 11 mm reunasta.

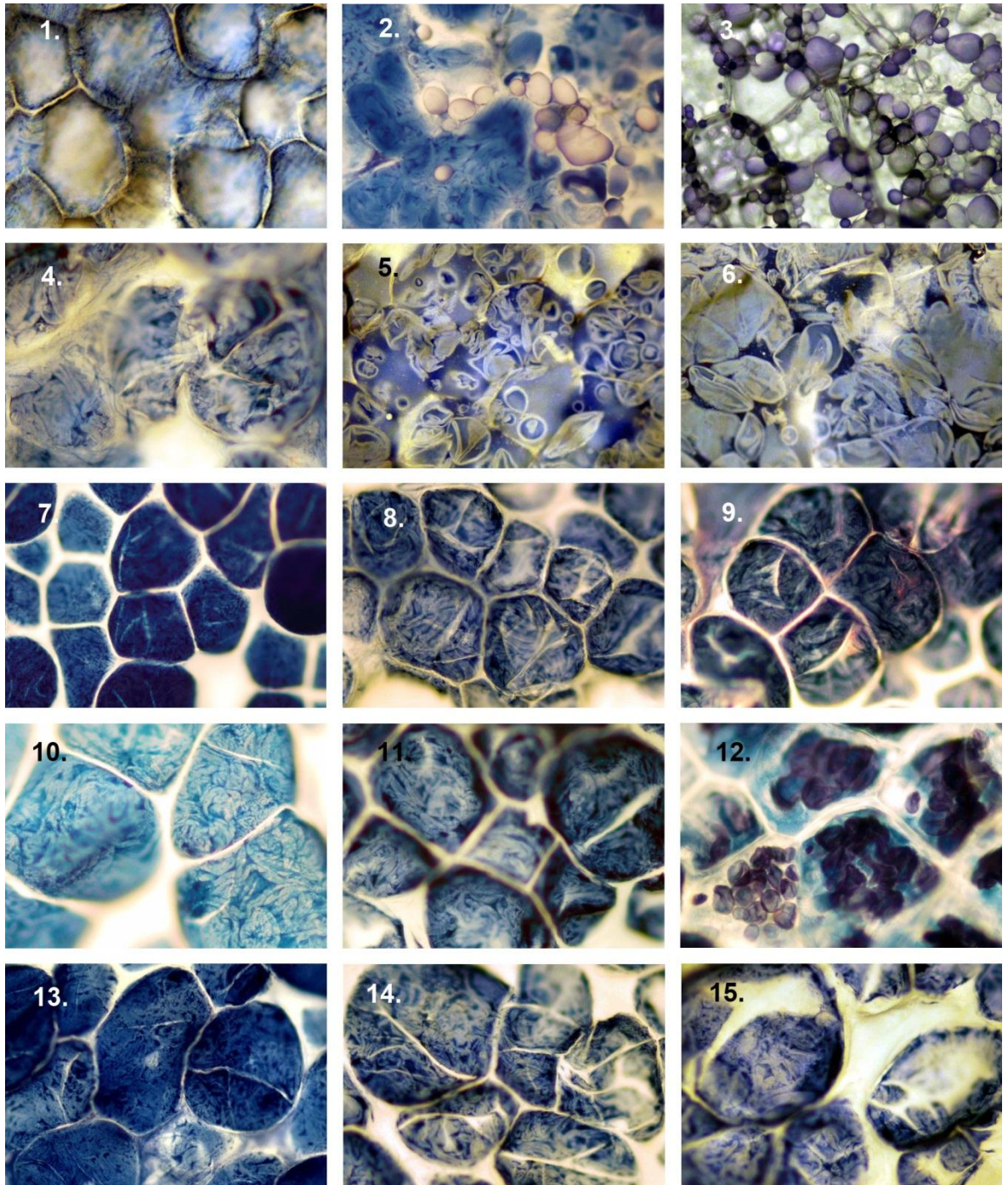
Kuviossa 46 on perunan solukkoa, jonka sisällä on gelatinoitumisen puolivälissä olevia tärkkelysjiyväsiä. Tärkkelysjiyväsellä on kerrosmainen sipulimainen rakenne. (Murkerjea; Murkerjea ja Robyt 2008). Kun tärkkelysjiyvät lähtevät purkautumaan, ne muodostavat pyöreitä lehtimäisiä kuvioita tai avautuvia nappuja, jotka ajan myötä muokkautuvat tiiviiksi rihmamaiseksi massaksi. (Vertaa Kuvio 55: Kypсэн solukon sisällä olevaa rihmamaista tärkkelystä.)

### 5.2.2 Tuloksia kolmelle eri kypsennystavalle

Kuvioissa 47–49 on esitelty otokset vesi- höyry- ja nyttikeiton mikroskooppikuvis- ta ja niiden tulkinnoista viidessä eri aikapisteessä. Kypsyysasteen toteamiseen tämä esitetty määrä on vähäinen, ja koosteen tarkoitus on ainoastaan havainnol- listaa näissä keittotavoissa havaittuja eroavaisuuksia. Kuvakoosteissa on kuvaot- teet jokaiselle kolmelle keittotavalle eri keittoajoilta seuraavalla tavalla:

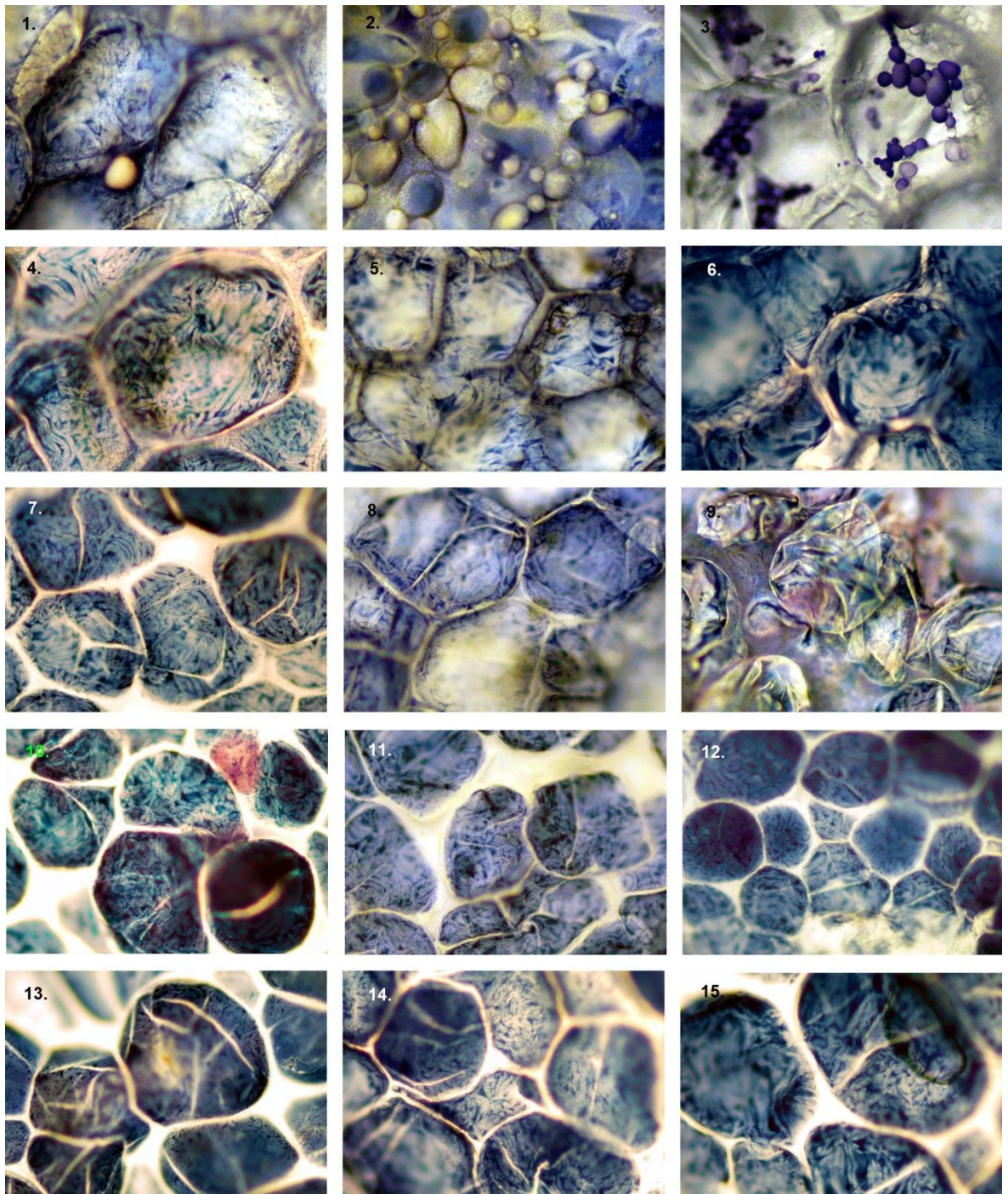
4 minuutin keitto, reuna	4 minuutin keitto, puoliväli	4 minuutin keitto, keskikohta
6 minuutin keitto, reuna	6 minuutin keitto, puoliväli	6 minuutin keitto, keskikohta
12 minuutin keitto, reuna	12 minuutin keitto, puoliväli	12 minuutin keitto, keskikohta
14 minuutin keitto, reuna	14 minuutin keitto, puoliväli	14 minuutin keitto, keskikohta
16 minuutin keitto, reuna	16 minuutin keitto, puoliväli	16 minuutin keitto, keskikohta

Tässä puolivälillä tarkoitetaan pallon muotoisen perunan säteen puoliväliä, ja kes- kikohta näin ollen on perunan keskikohta, eli säteen toinen pää.



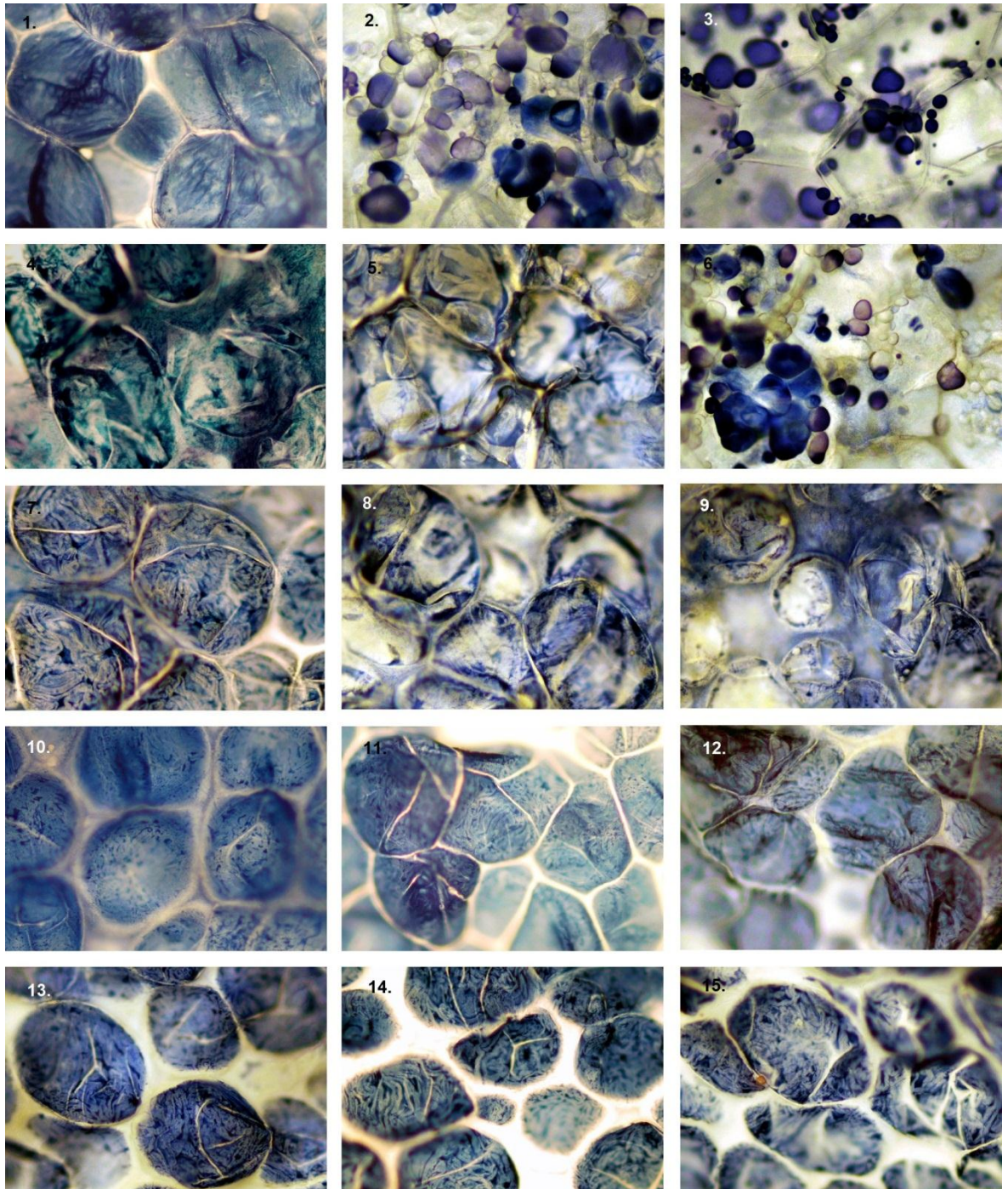
Kuvio 52: Mikroskooppitoksia höyrykeitosta.

- 1–3: **4 minuutin keitto** (1: 0 mm; 2: 10 mm; 3: 18 mm reunasta, keskikohta)  
Ehjäät soluseinät, tärkkelys gelatinoitunut reunassa, keskellä intaktia tärkkelystä.
- 4–6: **6 minuutin keitto** (4: 2 mm; 5: 13 mm; 6: 16 mm reunasta)  
Gelatinoitumassa oleva tärkkelys peittää ehjän solukon pinnan. Keskellä rikkonaisuutta.
- 7–9: **12 minuutin keitto** (7: 2 mm; 8: 10 mm; 9: 18 mm reunasta)  
Solukko erottuu selkeästi, soluseinät vahvoja, tärkkelys gelatinoitunutta.
- 10–12: **14 minuutin keitto** (10: 2 mm; 11: 12 mm; 12: 18 mm)  
Solukko irtoneista reunassa, keskellä vielä kiinni toisissaan. Luhistuneita, kesken-eräisiä tärkkelysjyväsä.
- 13–15: **16 minuutin keitto** (13: 0 mm; 14: 14 mm; 15: 18 mm)  
Solukko kypsää, keskellä solujen välissä laajoja vaaleita alueita.



Kuvio 53: Vesikeiton eri vaiheita:

- 1–3: **4 minuutin keitto** (1: 2 mm, 2: 10 mm, 3: 18 mm);  
Ehjat soluseinät, gelatinoitumatonta tärkkelystä nähtävissä.
- 4–6: **6 minuutin keitto** (4: 2 mm, 5: 10 mm, 6: 18 mm);  
Tärkkelys gelatinoitunut, soluseinät edelleen vahvat, pinnassa valuvaa tärkkelystä.
- 7–9: **12 min. keitto** (7: 4 mm, 8: 10 mm, 9: 18 mm);  
Reunassa irtonaista, keskellä vielä rikkonaista solukkoa.
- 10–12: **14 min. keitto** (10: 2 mm, 11: 12 mm, 12: 16 mm);  
Selkeää solukkoa, solujen välien läpikuultavuutta havaittavissa.
- 13–15: **16 minuutin keitto** (13: 5 mm, 14: 12 mm, 15: 18 mm eli keskikohta.)  
Läpikuultavuutta nähtävissä myös keskellä. Soluseinien rakenne ei erotu.



Kuvio 54: Nyyttikeiton eri vaiheita:

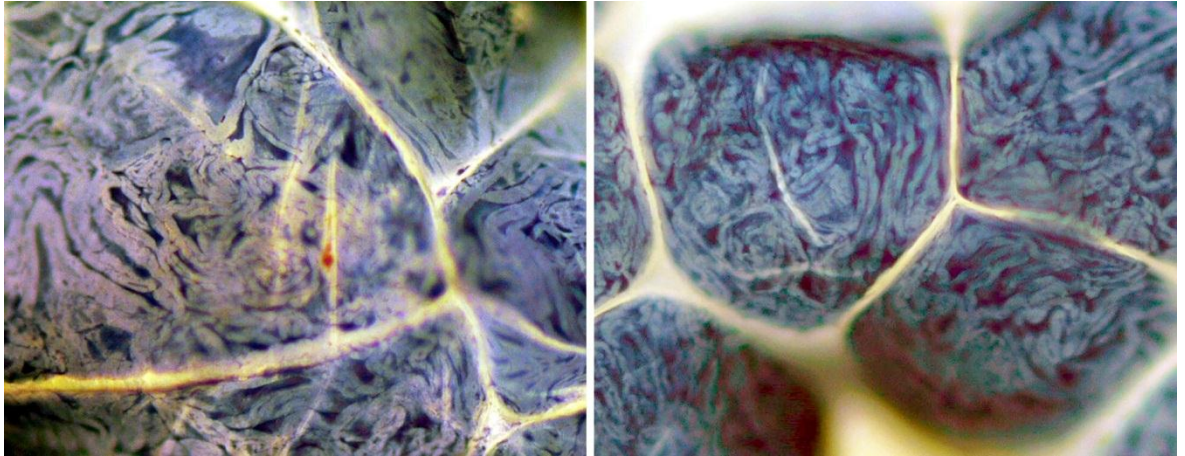
- 1–3: **4 minuutin keitto** (1: 0 mm, 2: 10 mm, 3: 16 mm);  
Ehjiä tärkkelysjyväsiä vielä suurimmassa osassa perunaa.
- 4–6: **6 minuutin keitto** (4: 1 mm, 5: 10 mm, 6: 16 mm);  
Reunassa rikkonaista solukkorakennetta, keskeneräistä gelatinoitumista, keskellä edelleen ehjiä jyväsiä,
- 7–9: **12 min. keitto** (7: 4 mm, 8: 12 mm, 9: 18 mm);  
Reunassa gelatinoituminen valmis, soluseinät edelleen vahvat, keskellä rikkonaista solukkorakennetta.
- 10–12: **14 min. keitto** (10: 2 mm, 11: 12 mm, 12: 18 mm);  
Selkeää solukkoa, reunassa irtonaisuutta, keskellä vielä solut toisissaan kiinni.
- 13–15: **16 minuutin keitto** (13: 2 mm, 14: 10 mm, 15: 18 mm eli keskikohta.)  
Erottuvat pyöreähköt solut reunassa, läpikuultavuutta välialueella. Keskellä solut kiinni toisissaan.

Edellä esitettyjen otosten (Kuviot 52, 53 ja 54) perusteella voidaan todeta, että nyttikeitto on selkeästi kahta muuta menetelmää jäljessä, koska 6 minuutin nyttikeitosta löytyi vielä ehjiä tärkkelysjyväsiä. Viitteitä höyry- ja vesikeiton eroista tulee esimerkiksi keittoajan 14 minuuttia kohdalla, jossa höyrykeitossa löytyi poikkeuksellisesti gelatinoitumattomia tärkkelysjyväsiä. Tämä todistaa myös luonnonmateriaalien arvaamattomuuden. Kaikilla keittomenetelmillä ilmenee 16 minuutin keittoajan yhteydessä solujen pyöristymistä ja solujen välillä oleva alue erottuu vaaleana. Solujen irtonaisuutta ei voida kuitenkaan havaita solujen ahtauden ja mikroskoopin lyhyen tarkennusvälin vuoksi.

### **5.2.3 Mikroskopoinnin arviointi**

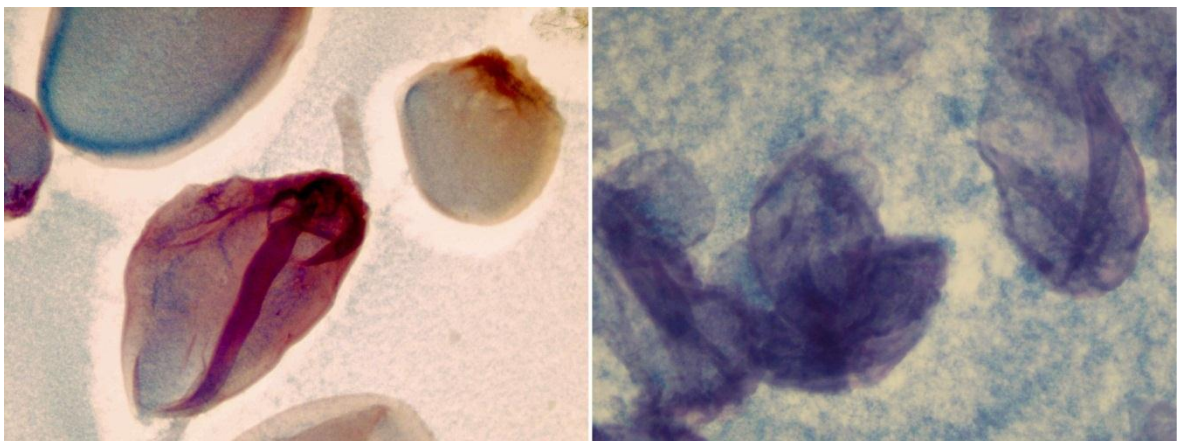
Mikroskooppikuvauksen aikapisteet valittiin sekä lämpökuvausten tulosten perusteella, jossa näkyi mahdollinen faasinmuutos 12 minuutin kohdalla, sekä lämpömittauksien perusteella ajoitetun gelatinoitumisen lämpötila-alueen perusteella. Kun verrataan saatuja kuvausten analyysejä lämmönsiirron tuloksiin, mikroskooppikuvissa 12 minuutin aikapisteessä perunan rakenne on vielä keskikohdassa kiinteää, eli soluseinät erottuvat selkeästi, mikä merkitsee sitä, että 12 minuutin aikapisteessä tutkimusperuna ei ole vielä täysin kypsää. Sen sijaan 16 minuutin aikapisteessä otetut mikroskooppikuvat erityisesti höyry- ja vesikeitetyistä perunoista osoittivat kypsyyden merkkejä. Gelatinoitumisen voidaan mikroskooppikuvien perusteella todeta tapahtuvan ennustetusti 55–70 C lämpötila-alueella.

Mikroskopoinnin tulosten arvioinnin laatu riippuu tulkitsijan asiantuntemuksesta. Myös itse mikroskooppikuvien onnistuminen on avainkysymys, jotta tulkintoja pystyisi niistä tekemään. Kaikkien työvaiheiden tulee onnistua, jotta tulos kuvaisi sitä mitä on tarkoitettu. Silti aina on mahdollista, että solurakenne muuttuu paljonkin sinä aikana kun leike valmistetaan mikroskoopille, ja jopa vielä mikroskoopin lampun alla.



Kuvio 55: Kypsän solun sisällä olevaa rihmamaista tärkkelystä.

Tätä työtä tehtäessä ei kypsyvän perunan mikroskooppikuvien tulkinnalle ollut saatavissa asiantuntija-apua. Kypsyysanalyysit on näin ollen tehty saatavilla olevan teorian pohjalta. Heikoiten tunnettu aihe tulkinnassa on tärkkelysjyvän hajoaminen visuaalisesta näkökulmasta. Tiedämme kuitenkin, että tärkkelys muodostaa rihmastoja, miltä kuvassa (Kuvio 55) oleva rakenne myös näyttää. Tärkkelysjyvän muodostaa myös hajotessaan erilaisia kuvioita solun pinnalle, mikä hämmentää mikroskooppikuvien tulkitsijaa.



Kuvio 56: Nyytin nesteestä löytyneitä kuorimaisia osia (v. 6min, o. 16min).(vm)

Nyytin nesteestä mikroskoopilla kuvatut kuorimaiset osat (Kuvio 56) ovat samankaltaisia epäselviä rikkonaisia rakenteita, joita näkyy keiton alkuvaiheessa ehjän solun päällä. (Kuvio 52: Mikroskooppitoksia höyrykeitosta./ 6) Myöhemmissä keittovaiheissa kuvattu solukko näkyy aina selkeänä, eikä rikkonaisia rakenteita näy. Rikkonaiset rakenteet on tulkittu solujen osiksi, tyhjiksi soluseinän kappaleiksi. Ei ole varmuutta siitä, miksi näitä ei myöhemmin näy, mutta kuten Harold Mc-

Gee teoksessaan 'On food and cooking' toteaa, kypsän perunan solut irtoavat helposti toisistaan (McGee 2004, 278). Näin ollen on mahdollista, että mikroskooppileikkeitä valmistaessa leikkuuterä rikkoo puolikypsän perunan soluja enemmän kuin kypsän perunan. Ehjä solukkopinta on kuitenkin tulkittu yhdeksi merkiksi siitä että kypsyminen on edennyt.



### 5.3 Rakennemittausten tulokset

Rakennemittausten tavoitteena oli todeta perunan kypsyminen, joka lämpötilamittausten perusteella tapahtui näiden tutkittujen 10–16 minuuttien aikana. Koko keittoaika oli 20 minuuttia, jolloin peruna ehti varmasti kypsäksi.

Alkumittausten pohjalta viitearvoiksi saatiin raa'an perunan keskimääräiseksi läpäisyvastukseksi noin 6–10 N, ja kypsälle perunalle arvo on noin 0,2–1 N.

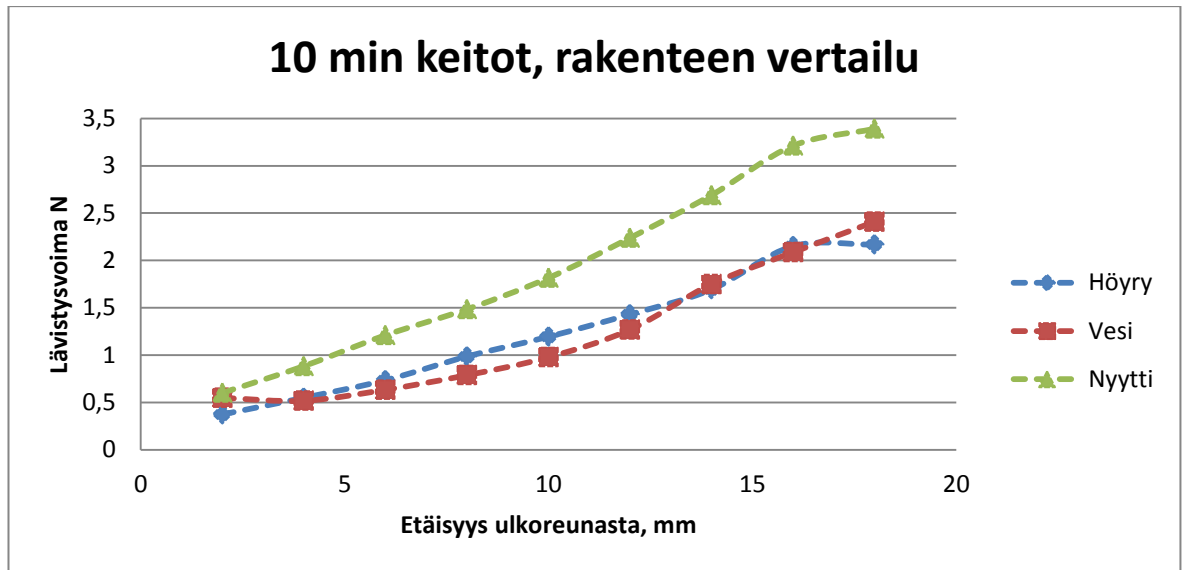


Kuvio 57: Rakennemittausten viitearvot raa'alle ja kypsälle Melody-perunalle

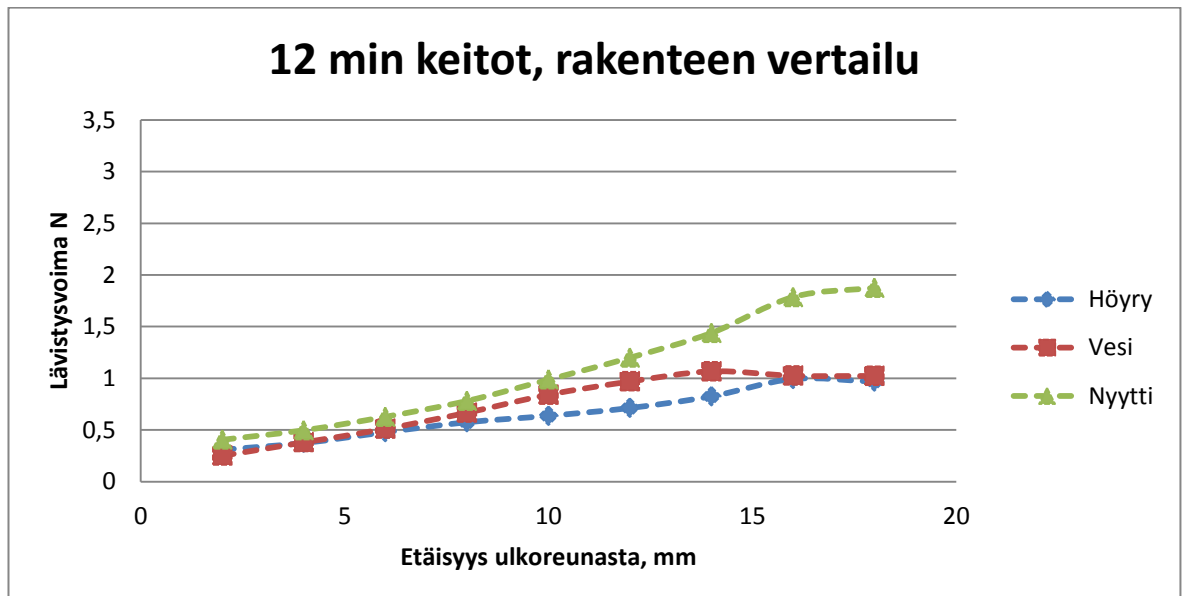
#### 5.3.1 Rakennemittausten tulosten analysointi

Nyytti- ja vesikeiton rakennemittauksista voidaan todeta, että rakenteen muutokset tasaantuvat 14 ja 16 minuutin aikapisteessä, jolloin rakenne alkaa olla samankaltaista läpi koko perunan. Nyytissä keitetyn perunan rakenne kuitenkin saavuttaa höyrykeitetyn perunan rakenteen 16 minuutin kohdalla.

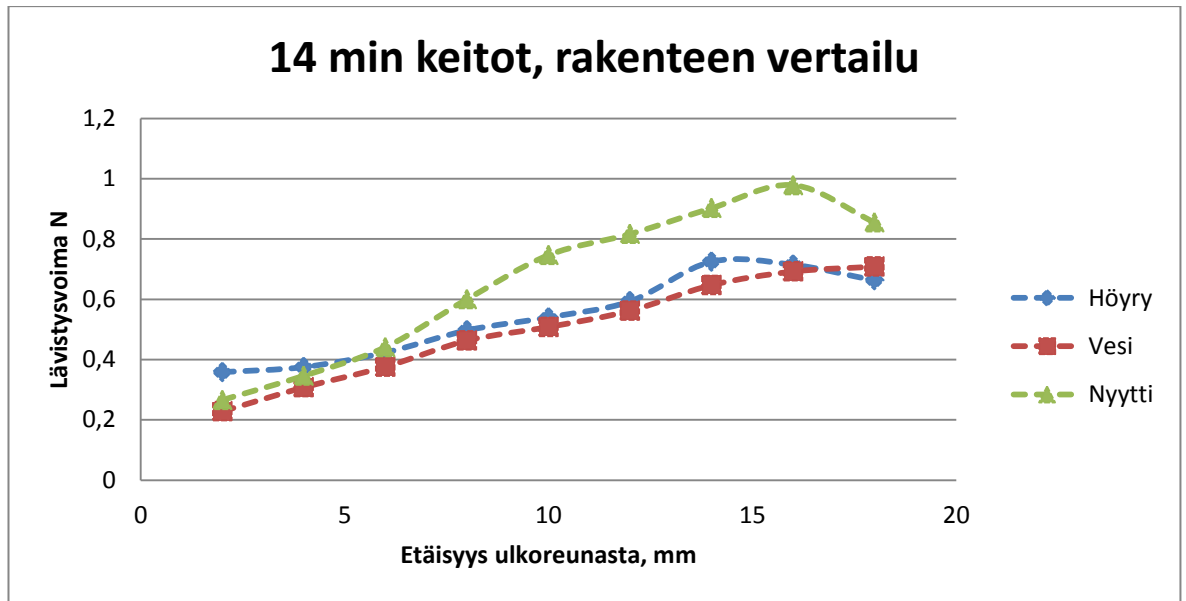
Näiden rakennemittausten perusteella eri keittomenetelmillä näyttää olevan eroja. Esimerkiksi vesikeitetty peruna näyttää saavuttavan pehmeämmän koostumuksen aikaisemmin kuin höyrykeitetty peruna, eli vesikeitto vaikuttaa kypsyttävän tehokkaammin. (Kuviot 59, 60, 61 ja 62)



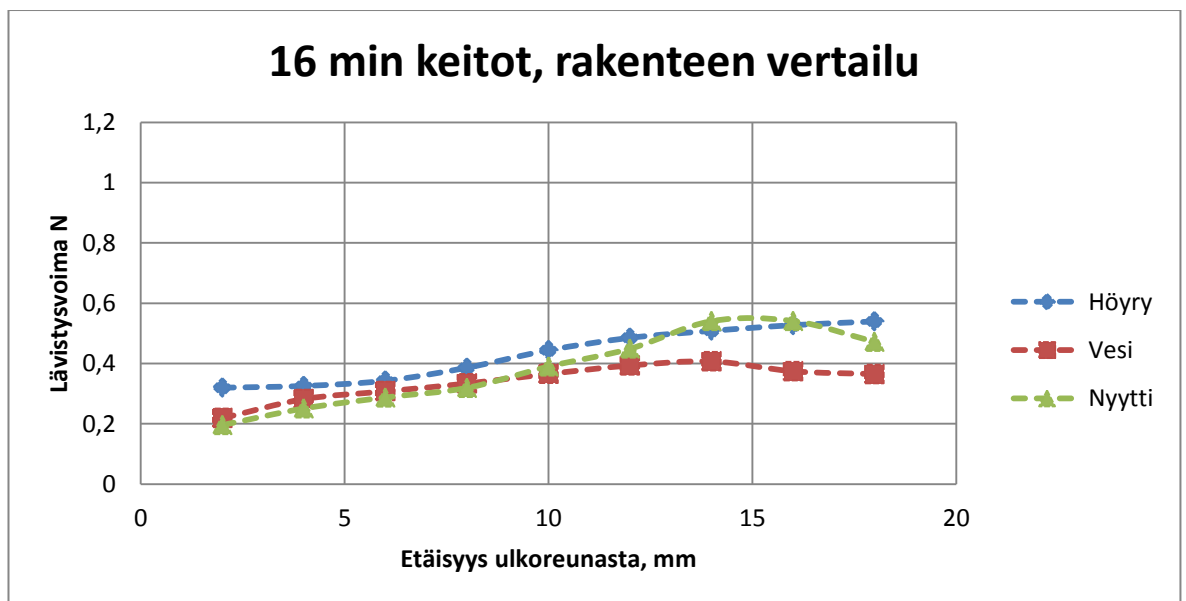
Kuvio 58: 10 minuutin keittojen keskinäinen rakenteen vertailu



Kuvio 59: 12 minuutin keittojen keskinäinen rakenteen vertailu

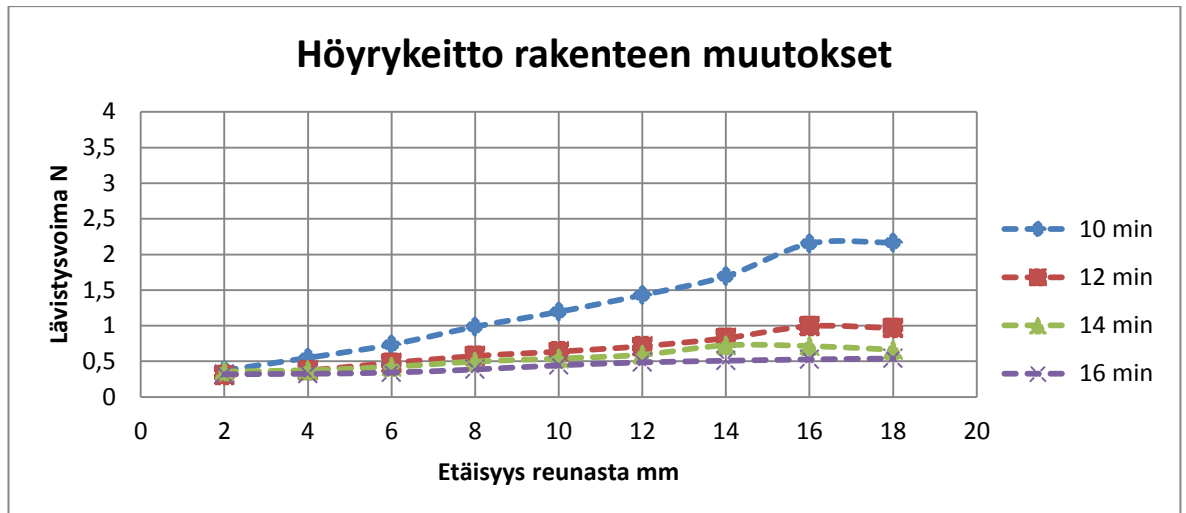


Kuvio 60: 14 minuutin keittojen rakenteen keskinäinen vertailu

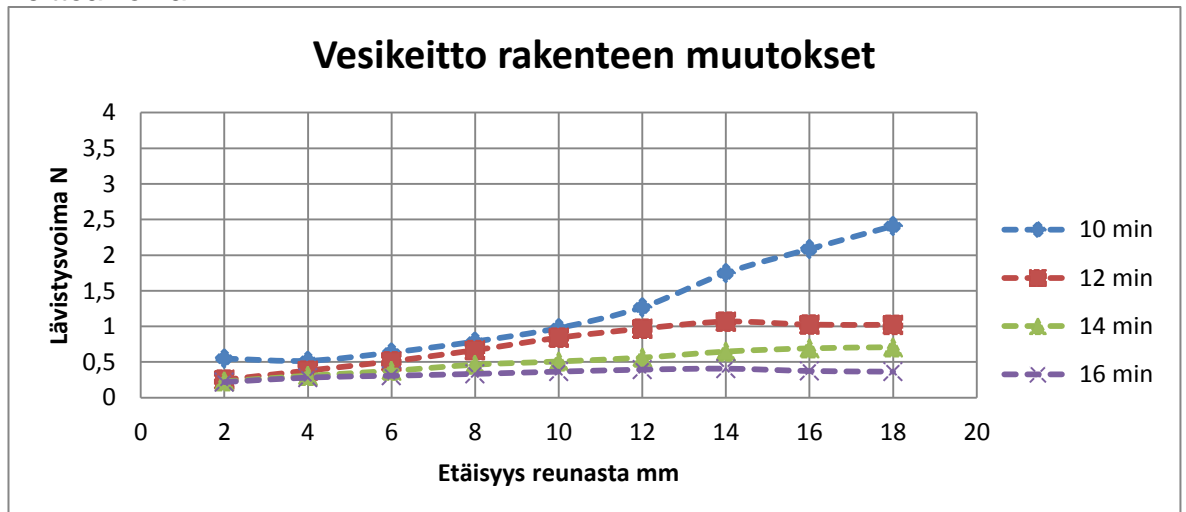


Kuvio 61: 16 minuutin keittojen keskinäinen vertailu

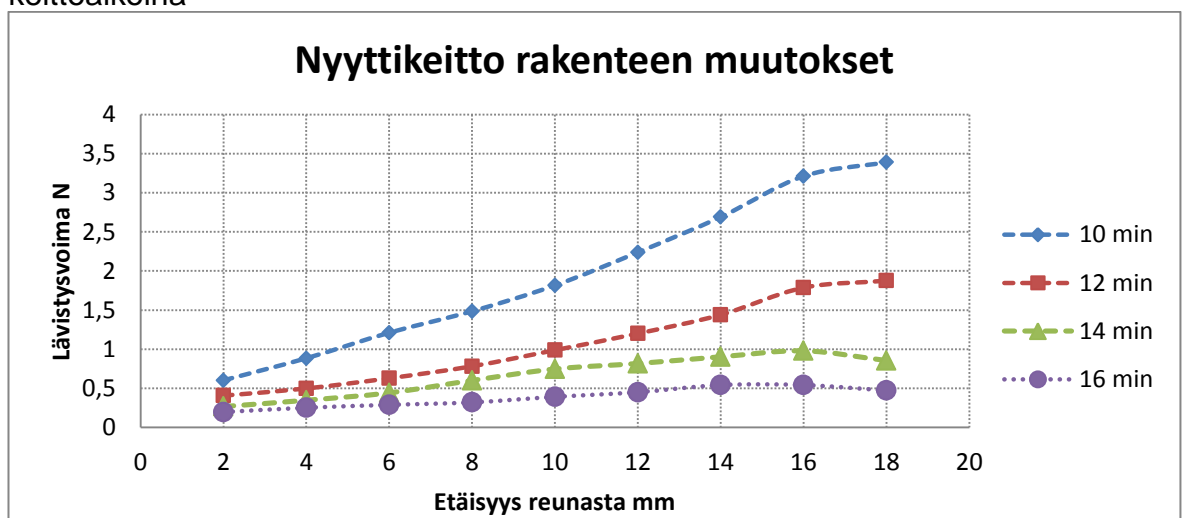
Kokonaisuutena rakennemittauksista voidaan nähdä höyry- ja vesikeittojen samankaltaisuus 10, 12 ja 14 minuutin keitoissa. Loppuvaiheessa perunan rakenne vaikuttaa jäävän höyrykeitossa hieman kovemmaksi. (Kuvio 61). Kuvioissa 63, 64 ja 65 on esitetty eri keittotapojen rakennemittausten yleiskuvaus. Rakennemittausten virhearviointit on esitetty työn liitteissä alkaen s. 113.



Kuvio 62: Höyryssä kypsennetyn perunan rakenteen muutokset valikoituina keittoaikoina.



Kuvio 63: Vedessä kypsennetyn perunan rakenteen muutokset valikoituina keittoaikoina



Kuvio 64: Höyrynyytissä kypsennetyn perunan rakenteen muutokset valikoituina keittoaikoina

### 5.3.2 Rakenneanalyysin arviointi

Rakennemittauksen aikapisteet valittiin lämmönsiirron tulosten perusteella, jossa näkyi mahdollinen faasinmuutos 12 minuutin kohdalla. Kun verrataan saatuja rakennemittausten tuloksia lämmönsiirron tuloksiin, on selvää, että 12 minuutin aikapisteessä rakenne on selvästi pehmentynyt kaikilla keittotavoilla. Selkeimmin muutos näkyy höyry- ja vesikeitoilla, joiden rakenne 12 minuutin jälkeen lähestyy kypsän peruna viiteylärajaa 1 N. Saadut tulokset ovat johdonmukaisia, eli kypsyminen oli tuloksista havaittavissa. Myös nytyissä kypsennetyin perunan myöhäisempi pehmeneminen oli odotettu tulos. Kahdentoista minuutin keiton jälkeen rakenteen muutokset kuitenkin jatkuvat suurina, höyry- ja vesikeitoissa 14 minuutin aikapisteeseen saakka, minkä jälkeen rakenne alkaa tasaantua. Kuudentoista minuutin aikapisteessä rakenne lähentelee kaikilla keittotavoilla tasaista laatua.

Tässä työssä rakennemittaukseen käytetty kokonaisaika oli vähäinen, ja sen tarkoituksena oli menetelmän testauksen ohella pääasiassa tuoda vastauksia kerätyn lämmönsiirtodatan herättämiin kysymyksiin. Rakennemittauksien merkitys juuri kypsymisen määrittämiselle on hyvin keskeinen, koska sen voi korvata ainoastaan aistinvaraisella arvioinnilla.

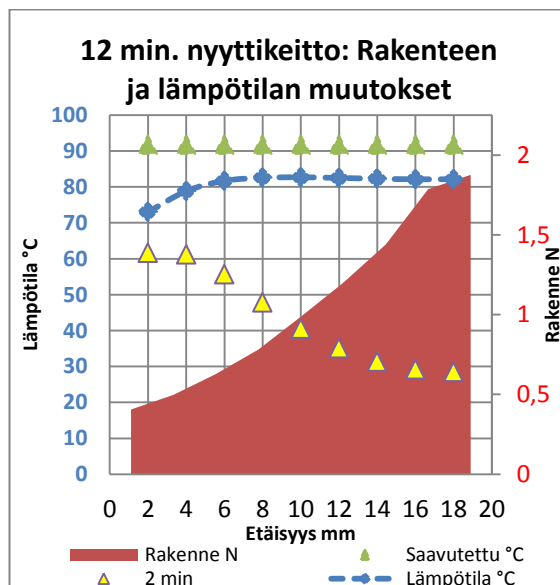
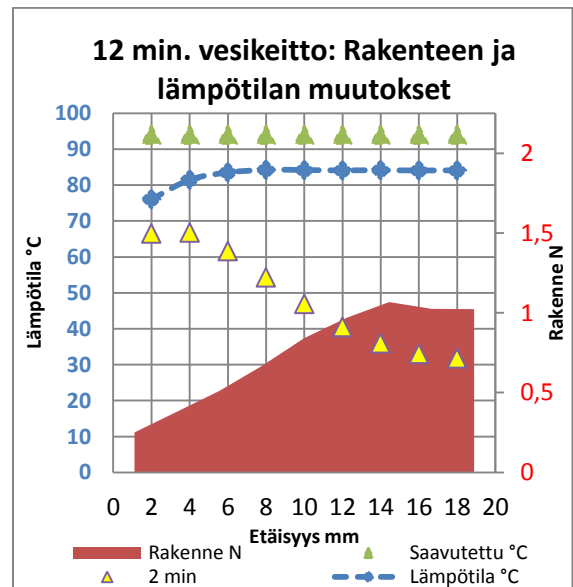
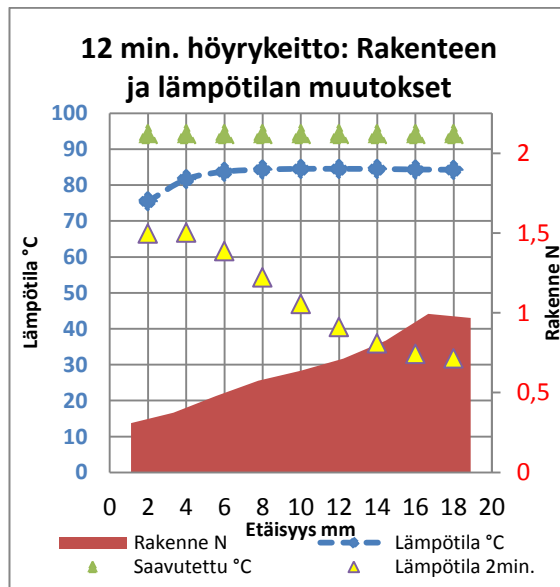
Rakennemittausten otosmäärä oli pieni, ja parhaan tuloksen saavuttamiseksi myös aikapisteiden määrä tulisi olla suurempi. Nyt erityisesti nytytikeiton osalta näkyi, että myöhäisempi aikapiste olisi ollut tarpeen. Nyt saadut tulokset ovatkin lähinnä suuntaa-antavia, joiden perusteella voidaan jatkaa tutkimusta eteenpäin.

Valittu työkalu, 2 mm:n sylinteri oli tarkoitukseensa hyvin perusteltu, ja samaa työkalua oli käytetty muun muassa päärynän kypsyyden mittaamiseen. Koska materiaali oli erityisesti kypsänä kovin haurasta, käytettiin mittausalustana ehjää sileää levyä, jolloin sylinterin mahdolliset kosketukset levyn pintaan jouduttiin poistamaan datasta erikseen. Toinen vaihtoehto olisi ollut levy jossa oli keskellä reikä, mikä olisi estänyt pintakosketuksen. Tätä ei käytetty sen vuoksi, että pehmeä rakenne saattaisi romahtaa sylinterin edellä. Tätä ei kuitenkaan testattu, joten vaihtoehto saattaa olla jopa parempi: Mittauksen loppuvaiheen vastuksen nousun muut syyt voitaisiin tällöin paremmin sulkea pois.

Jokaista rakennemittauksen 2 mm:n välimatkoin laskettua keskiarvopistettä vastasi 6 eri mittauksen tuhannet arvot. Tämä karsi kaikki piikit ja tuotti hyvin tasaiset käyrät. Todellinen vaihtelu eri mittausten välillä oli suuri, kuten näkyy keskihajonnasta. Keskiarvon keskivirhe kuihtui huomaamattomaksi suuren datamäärän kera.

## 5.4 Tulkinnan esimerkki 12 minuuttia keitetylle perunalle

### 5.4.1 Rakennemittaus ja lämpötilatieto

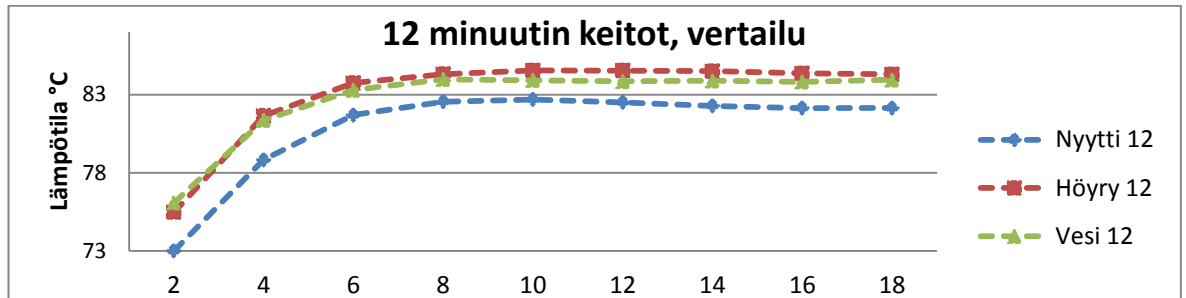


Vertailussa olevassa kaaviokuvassa on sinisellä 12 minuutin keiton lämpökameran mittaustulokset reunasta keskikohtaan. Ylimpänä lämpötilaviitteenä on termoparin perunan keskikohdasta mittaama arvo, alimpana ovat lämpökameran mittaamat lämpötilat keiton alusta. Samassa taulukossa on myös perunan rakenne mitattuna samoista mittauspisteistä.

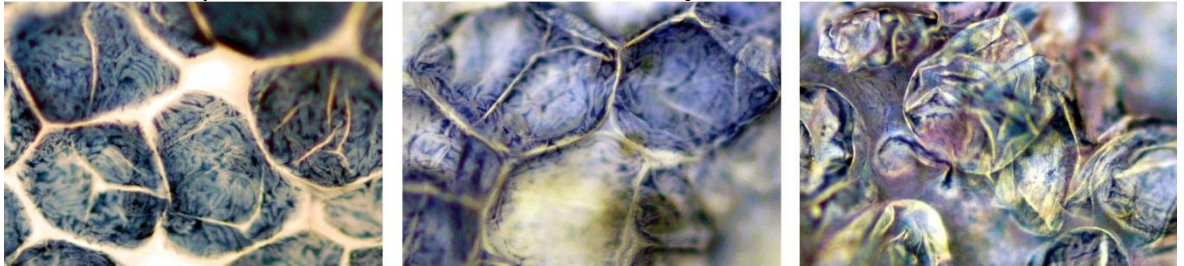
12 minuuttia keitetyn perunan rakenne on vielä hyvin kiinteää. Tässä vaiheessa höyrykeitetyn perunan rakenne vaikuttaa pehmenneen hieman vesikeitettyä peru-

naa enemmän. Nyytti on selvästi jäljessä, ja tämä johtuu siitä että saavutettu lämpötila on vielä alle 90 °C. Nyytissä höyrytetyn perunan vaikuttavana tekijänä on eristävä paperi, jonka takia lämmönsiirrolle tulee lisää rajapintoja.

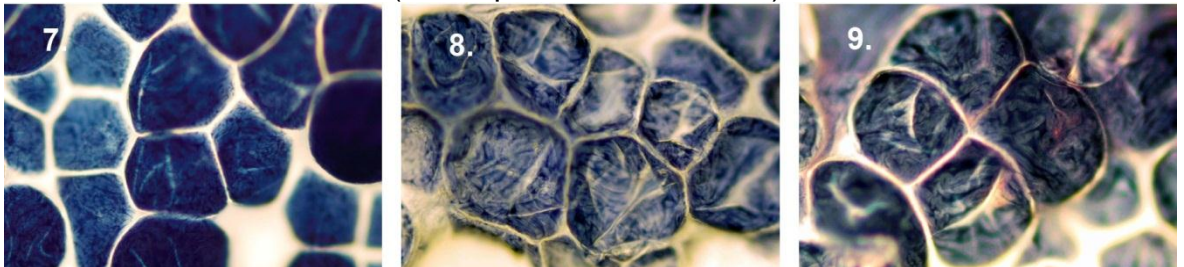
#### 5.4.2 Mikroskooppikuvien ja lämpödatan yhdistäminen



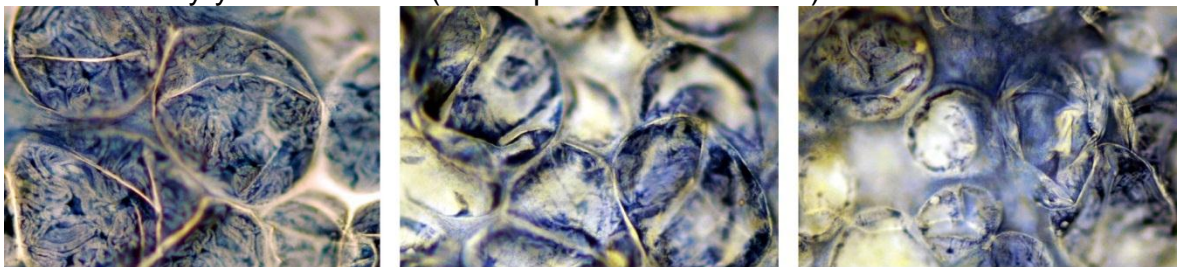
Kuva 65: Lämpötilan vertailu 12 minuutin keittoajalla eri keittotavoilla



Kuvio 66: Vesikeitto 12min (reuna-puoliväli-keskikohta)



Kuvio 67: Höyrykeitto 12 min. (reuna-puoliväli-keskikohta)



Kuvio 68: Nyyttikeitto 12 min (reuna-puoliväli-keskikohta).

Lämpötilatieto ja mikroskooppikuvat voivat toimia keskenään kypsyyden toteamisen työkaluina. Lämpötilatietojen perusteella höyry- ja vesikeitto ovat hyvin samankaltaisia, mutta höyrykeitto on aavistuksen edellä. Nyyttikeitto on reilusti jäl-

jessä, mikä voidaan todeta myös mikroskooppikuvista, jossa nyyttikeitetyn perunan soluseinät ovat hyvin vahvat kaikissa kuvissa.

### **pH:n vaikutus tuloksiin**

Tulosten tulkinnessa on otettava huomioon pH:n vaikutukset.

Rakennemittauksissa vedessä keitetyn perunan vastus oli lopulta kaikkein pienin. (16 min. keitto). Tämä voi johtua veden pH-arvosta 8, mikä pehmentää perunaa. Tutkimuskohteena olleen perunan oma pH-arvo oli 5,98, eli lievästi hapan. Keittovesi siis muutti perunan pH-arvoa emäksiseen suuntaan.

Höyryn pH oli omien mittausten pohjalta keittovettä happamempaa, koska höyry ottaa ilmasta hiilidioksidia: Happamuus hidastaa kypsymistä. 2.2.3

Ruoanlaittopaperinyytissä keitetty peruna sai kypsyä omissa nesteissään. Perunasta keiton aikana irtoava neste oli mittauksien mukaan pH-arvoltaan noin 5,8, eli samaa luokkaa perunan kanssa. Happamissa olosuhteissa peruna kypsyy hitaammin. Rakennemittausten perusteella nyytissä kypsennetty peruna saavuttaa lopulta lähelle saman tason höyrykeitetyn perunan kanssa.



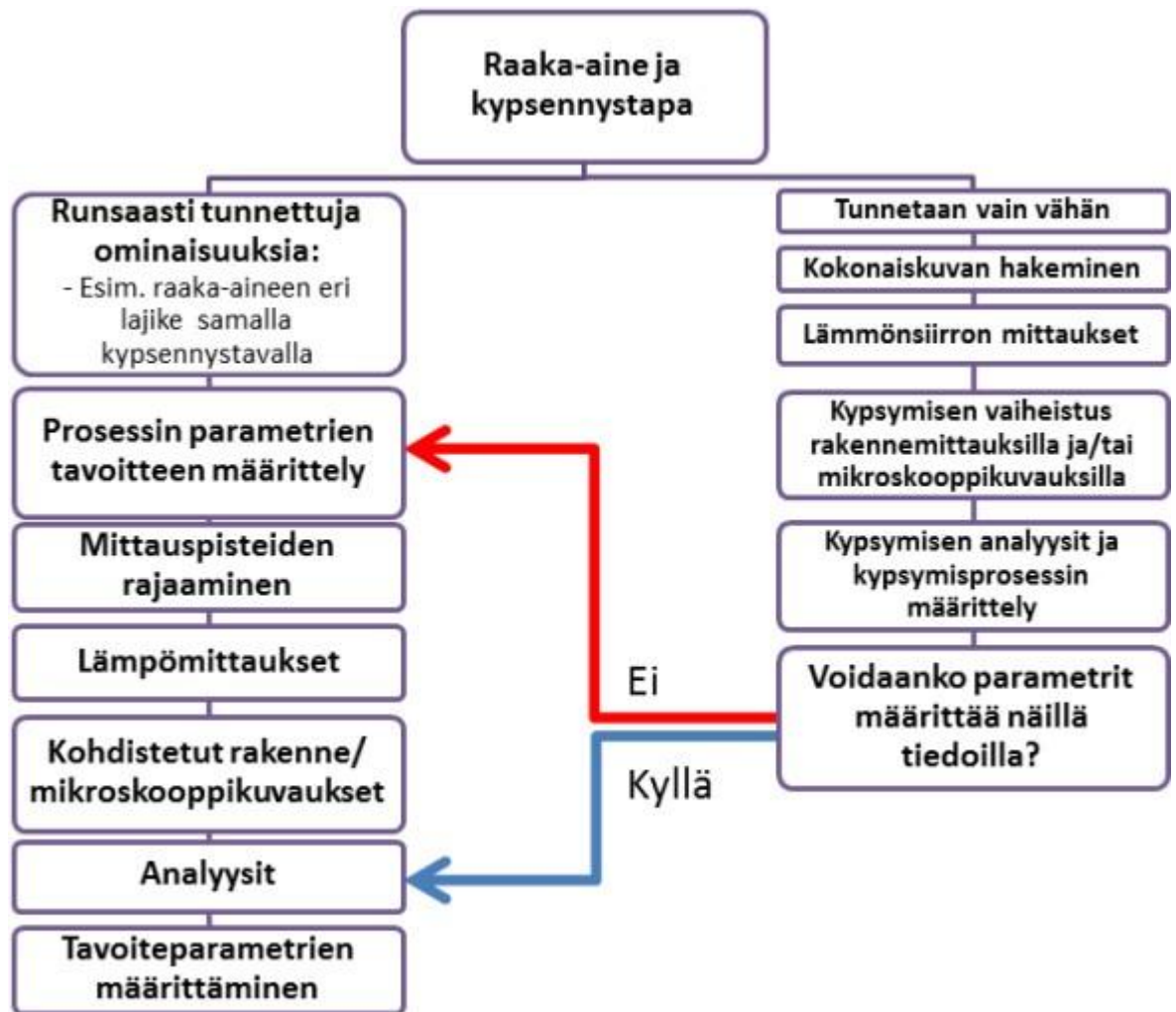
## 6 MENETELMÄN SOVELTAMINEN JA PROSESSIN KULKU

Tässä työssä esitetty menetelmä on periaatteessa suoraan sovellettavissa sellaisille kypsennysmenetelmille, joissa kypsyminen etenee pinnasta kohti keskipistettä. Mitä enemmän eroja raaka-aineessa ja kypsennystavoissa on verrattuna tässä työssä esitettyihin, sitä enemmän menetelmää täytyy mukauttaa ja miettiä mitä vaikuttavia tekijöitä nämä erot tuovat mukanaan.

Valmistusprosesseissa määriteltäviä parametreja ovat erityisesti lämpötila ja aika. Kun kypsymisen kuvausmenetelmää sovelletaan käytännössä, lähtökohtina ovat aina raaka-aine ja kypsennystapa. Jos kypsymisen kuvausta ei ole aikaisemmin sovellettu kummallekaan näistä, on hyvä määrittää kypsymisen kokonaiskuva laajemmalla määrittelyvälillä. Jos puolestaan on kyse tilanteesta, jossa ominaisuudet ovat jo hyvin tunnettuja, mutta esimerkiksi raaka-aineen lajike on uusi, voidaan menetelmän seurantajakso toistoinen sijoittaa pienemmälle määrittelyvälille aikaisemman tiedon pohjalta.

Määrittelyväleissä on huomioitava, että jos on määriteltävä sekä prosessilämpötila että aika, tulee seurannassa olla kuitenkin vain yksi muuttuja kerrallaan. Jos haetaan kypsennyslämpötilaa, seurannassa tulee käyttää samoja vertailuaikoja. Jos haetaan kypsennysaikaa, tulee seurannassa käyttää samaa vertailulämpötilaa.

Kypsymisen kuvausmenetelmän runkona ovat lämpötilan ja ajan määritykset lämpömittauksilla. Näihin perustuen saadaan kypsymistieto yhdistettyä rakenteeseen ja solutason muutokseen kypsymistä vaiheistavilla menetelmillä, eli rakennemittauksilla ja mikroskopoinnilla. Kuviossa 69 on esitetty kypsymisen kuvausmenetelmän prosessi, joka auttaa soveltamisen suunnittelussa alkuun. Lopullinen kypsymisen kuvauksen prosessi riippuu monesta eri tekijästä: Tavoitteista, raaka-aineesta, kypsennysmenetelmästä, laitteista ja olosuhteista.



Kuvio 69: Kypsymisen kuvausmenetelmän prosessi

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Käytössämme on paljon tietoa siitä, mitä perunalle kypsyessä tapahtuu. Silti jokainen lajike ja materiaali on yksilö. Tässä työssä on tutkittu vuosien 2010 ja 2011 satojen Melody-lajikkeen perunaa, ja saadut tulokset pätevät vain näille. Silti tuloksia voidaan käyttää perustana haettaessa mittauspisteitä jollekin toiselle lajikkeelle.

Tämä työ sisälsi kolme toisiaan täydentävää menetelmää kypsymisen kuvaamiseen: lämmönsiirtymisen seuranta, mikroskooppitutkimus ja rakennetutkimus. Kypsymisen kuvausmenetelmän olennainen tavoite on oikean aikapisteen löytäminen: aikapiste, jolloin peruna on halutussa kypsyysvaiheessa. Toinen olennainen tekijä on kypsennyslämpötila. Näiden hakemisessa lämmönsiirron mittaukset ovat olennainen ja ensisijainen menetelmä.

Lämmönsiirron mittauksissa käytetyt välineet, lämpökamera, termopari ja mittaukset taltioiva videokamera todettiin hyväksi yhdistelmäksi. Niiden avulla saadaan koottua mittausdataa perunan reunasta kohti keskustaa sekä tietoa jäähtymisen vaikutuksista mittaustuloksiin. Jäähtymisen vähentämiseksi on kuitenkin vielä tehtävä lisää kehitystyötä ja pyrittävä vähintään vakioimaan se, jotta sen vaikutukset pystyttäisiin oikaisemaan laskennallisesti.

Pyöreä, lämpömittausten yksiulotteisuuden mahdollistava perunan muoto toimi kokoavana tekijänä läpi koko kypsymisen kuvausmenetelmän. Kaikilla kolmella menetelmällä kypsymistä seurattiin perunan säteellä kohti sen keskipistettä. Näin kaikkia kolmea menetelmää voi yhdistää todentamaan perunan kypsymistä. Idea lähti lämmönsiirron mittauksista, joissa sovellettiin pyöreän kappaleen yksiulotteisuuden mahdollistavaa tulkintatapaa.

Looginen jatkumo perunan sädettä pitkin kohti keskustaa tehtävälle mittaukselle saatiin rakennemittauksesta, jossa 2 mm:n sylinteri porautui perunaan pinnasta kohti keskipistettä. Rakennemittaukset ovat kypsymisen määrittämisessä seuraava hyvin tärkeä menetelmä, joka mahdollistaa nopean ja vertailukelpoisen mittaus-tiedon perunan pehmeysasteesta.

Kolmas kypsymisen kuvausmenetelmä, mikroskopointi, on kypsymisen visuaalista havainnointia, jolla ei olisi pohjaa ilman tietoa kohteen lämpötilasta. Ollakseen toimiva menetelmä se vaatii taakseen paljon kuvamateriaalia, kokemusta ja osaamista. Perunan kypsymisen teoriatieto pohjautuu hyvin pitkälle solurakenteen muuttumiseen ja gelatinoitumisprosessiin. Mikroskooppikuvat ovat teoreettisen tiedon tarpeellinen aisapari, jolla tieto voidaan konkreettisesti todentaa.

Lämpömittausten pohjalta laskelmia voidaan käyttää hyväksi myös materiaalin lämmönsiirtymisen ominaisuuksien määrittämiseen. Tällöin haasteena on hallita kaikki muuttuvat tekijät, jotka on pyrittävä vähentämään minimiin. Tässä työssä esimerkiksi raa'an ja kypsän perunan vertailussa materiaaliominaisuudet vakioitiin ennen mittauksia, jotta itse materiaalissa ei mittauksen aikana tapahtuisi muutoksia. Myös mittausolosuhteet pyrittiin vakioimaan siten, että itse materiaali ei muuttuisi, vain lämpötila. Mutta kuten on todettu, materiaaliominaisuuksien määrittäminen vaatii paljon ennakkointia ja kaikkien vaikuttavien tekijöiden mitattavuutta.

Kypsymisen kuvausmenetelmän kehittämisvaiheessa käytetyistä työtavoista on todettava, että niissä oli korjattavaa. Tämä työ onkin hyödyllinen tietopankki, jonka pohjalta menetelmää voidaan toteuttaa paremmin, soveltaa ja kehittää. Tämän työn tekemisen kautta on myös noussut esille asioita, joita mahdollisesti tulisi tutkia lisää.

Gelatinoitumisen faasinmuutos, kypsymisen käännekohta tai muut tekijät, jotka mahdollisesti aiheuttivat faasinmuutoksen, nousivat esille lämpökuvadatan pohjalta. Sen aikapisteittä ei vielä tällä tutkimusdatalla voinut varmuudella kohdentaa, vaikka termoparimittauksista löytyikin osittaisia yhteneväisyyksiä lämpökuvadaan verrattuna. Tutkimusmenetelmät ja materiaali sisältävät kuitenkin vielä liikaa muuttujia. Jatkossa siis lämmönsiirron mittausmenetelmiä tulisi kehittää edelleen, jotta muuttuvat tekijät saataisiin paremmin hallintaan. Mittauksia tulisi myös pyrkiä kohdistamaan tarkemmin niihin aikapisteisiin, joissa oletettu faasinmuutos on.

Myös materiaaliominaisuuksien määrittämisessä oli hallitsemattomia muuttujia, kuten vaikuttavan fluidin virtaukset, jotka vaikuttivat lämmönsiirtokertoimen suuruuteen ratkaisevasti. Fluidin virtauksen määrittäminen on erittäin tärkeä seikka, jotta tulokset olisivat uskottavia. Lisäksi, lähdekirjallisuudesta haetut arvot, kuten

lämpötila- ja materiaaliirippuvainen lämpötilan tasoittumiskerroin ovat usein yhden tiedon varassa: käytettävissä oli vain yksi viitearvo yhdelle lämpötilalle. Työtä materiaaliominaisuuksien määrittämisessä olisi siis paljon.

Mikroskooppikuvien tulkinta vaatisi enemmän vertailuaineistoa ja osaamispohjaa. Menetelmä ei vaikuta olevan kovinkaan yleisesti käytetty elintarvikkeiden kypsyyden määrittämiseen, koska muut menetelmät menevät käytännöllisyydessään edelle. Näin myös alan osaaminen on harvojen käsissä, minkä vuoksi menetelmän käyttö on kallista. Toisaalta, kun kuvapankkia kokoaa vähän kerrallaan, on sen aineisto sen myötä käytettävissä, tulkinta opittavissa ja osaaminen jaettavissa.

Kypsyyden rakennemittaukset ovat käytännöllinen ratkaisu, koska rakennemittausten sijaan tarvittaisiin koulutettua henkilöstöä, joka pystyisi tuottamaan tietoa kypsyyksistä aistinvaraisen arvioinnin perusteella. Rakennemittausten hallinta ei ole niin tietopainotteista kuin mikroskopointi, jolloin sen hankkiminen palveluna on todennäköisesti helpompaa. Tässä työssä rakennemittauksien menetelmän valintaan käytettiin suhteessa muihin analyysieihin verrattain vähän aikaa, ja menetelmän säätäminen tarkoituksenmukaisemmaksi vaatisi vielä jonkun verran vaivannäköä.

Tässä työssä käytiin perunan kypsymisprosessi hyvin yksityiskohtaisesti läpi, mutta tavoitteena oli lopulta pyrkiä pelkistämään kokonaisuus sovellettavaan muotoon. Kypsymisen kuvausmenetelmä kiteytyy kappaleessa 6 esitettyyn prosessikaavioon, jossa lähdetään kysymyksestä: mitä jo tiedetään. Prosessin keskeinen tekijä on lämmönsiirron mittauksista kerätty tieto ajan ja lämpötilan vuorovaikutuksesta. Tämä tieto yhdistetään vaiheistavilla menetelmillä (rakennemittaukset ja mikroskopointi) kokonaistiedoksi raaka-aineen kypsymisestä. Se, miten laajasti kypsymisen kuvaus tehdään, riippuu raaka-aineesta ja kypsennystavasta käsillä olevan pohjatiedon määrästä. Menetelmän soveltaminen vaatii siis aina tapauskohtaista arviointia.

## LÄHTEET

- Ahvenniemi, P. 2012. Perunalajikkeiden nykyinen keittolaadun luokittelu vaatii remontin. [verkkosivu]. [Viitattu 2.3. 2102]  
<http://www.saunalahti.fi/ahven/peruna/learti12.htm>.
- Antila, A-M, M Karppinen, M Leskelä, H Mölsä, ja M Pohjakallio. 2009. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita.
- Belitz, H-D, W Grosch, ja P Schieberle. 2004. Food Chemistry, 3rd revised Edition. Berlin: Springer-Verlag.
- Cengel, Y. A., ja A. J. Ghajar. 2011. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 4th edition. New York: McGraw-Hill.
- Charm, S. E. 1963. The fundamentals of food engineering. Westport, Connecticut: Avi Publishing Company.
- Coultate, T. 2009. Food, The Chemistry of its Components. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Damodaran, S, Parkin K. ja Fennema, O. 2008. Fennema's Food Chemistry, Fourth Edition. Wisconsin/ Boca Raton: CRC Press.
- Deguchi, S, Tsuijii K. ja Horikoshi K. 2006. Cooking cellulose in hot and compressed water. Yokosuka: Chemical Communications.
- Douzals, J.P., Marechal J.C, ja Gervais P. 1996. Microscopic Study of Starch Gelatinization under High Hydrostatic. Dijon, Quetigny: Laboratoire de Génie des Procédés Alimentaires et Biotechnologiques, ENSBANA; Laboratoire de Génie des Agro-équipements et des Procédés, ENESAD.
- Eliasson, A.C. 2004. Starch in Food: Structure and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing, Ltd.
- Engineering Toolbox. 2012. Water Vapor - Specific Heat. [verkkosivu]. [Viitattu 31.08. 2012] [http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-d\\_979.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-d_979.html).
- Fellows, P.J. 2009. Food processing technology, principles and practice, third edition. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Flint, O. 1994. Food Microscopy. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd.
- Flir Systems. 2007. Referenssiopas. Wilsonville: Flir Systems.

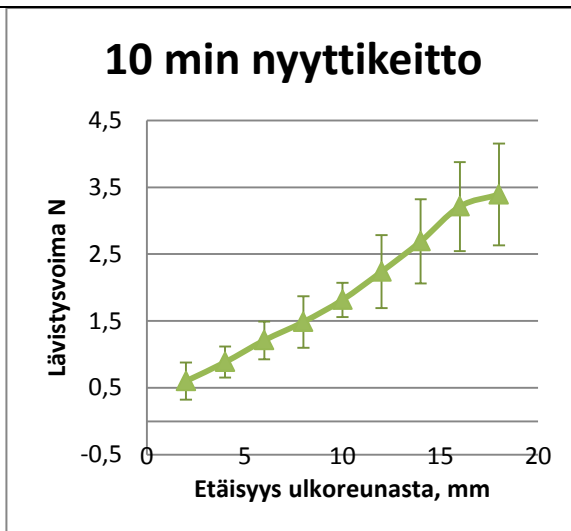
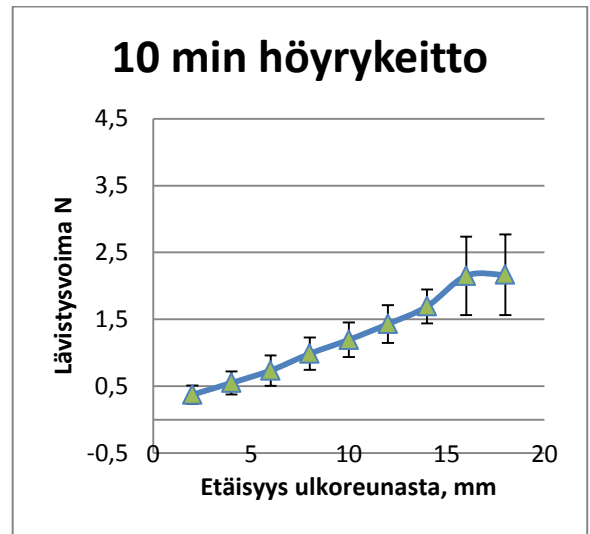
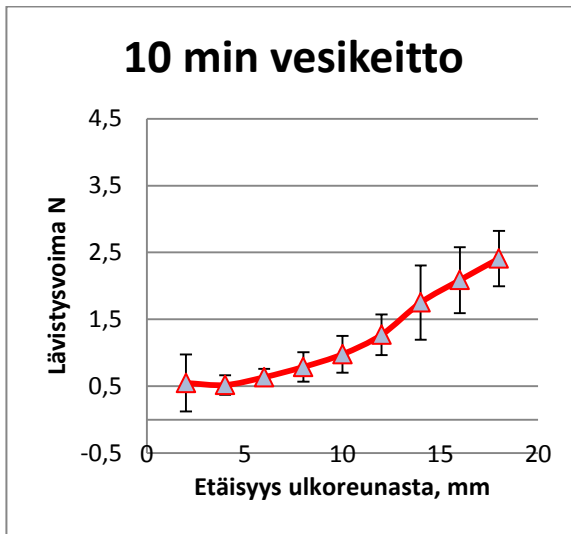
- Hallström, B. Skjöldebrand C. ja Trägårdh C. 1988. Heat Transfer and food products. London: Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
- Hautala, M., ja Peltonen H. 2009. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa I. Saarijärvi: Lahden Teho-Opetus Oy,
- Heisler, M. P. 1947 "Michigan Tech." Temperature Charts for Induction and Constant-Temperature Heating. [verkkosivu]. [Viitattu 16. 09 2012]  
<http://www.chem.mtu.edu/~fmorriso/cm3215/HeiserChartArticleTransASME1947.pdf>.
- Ikonen, T. 2002. Perunatärkkelyksen rakenne. Helsinki: Helsingin Yliopisto
- Jyväskylän yliopisto. JYU. 2012. [verkkosivu]. [Viitattu 08. 08 2012]  
[https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/kema230/Ohjeet/tyo10\\_042008.pdf](https://koppa.jyu.fi/avoimet/kemia/kema230/Ohjeet/tyo10_042008.pdf).
- Kilcast, D. 2004. Texture in Food, Volume 2 : Solid Foods. Cambridge: Woodhead Publishing, Ltd.
- Lampiselkä, J. Agge, K. Lavonen, K. Juuti, K. Meisalo V. ja Mikama A. "Kemian menetelmät ja kvalitatiiviset mallit: Aineiden ominaisuudet." eNorssi. 2006. [verkkosivu]. [Viitattu 4. 8 2012] <http://www.enorssi.fi/enorssi-verkosto/virmo/virmo-1/matemaattiset/fysiikan-ja-kemian-didaktiikka/fysiikan-didaktiikan-materiaaleja/fysiikan-ja-kemian-sisaltotietoa-luokanopettajaksi-opiskeleville>.
- Lappeenranta University. LUT. 2010. [verkkosivu]. [Viitattu 15.09.2012]  
[http://www.kurssit.lut.fi/040301000/main/2\\_4.html](http://www.kurssit.lut.fi/040301000/main/2_4.html).
- Louhenkilpi, S. 2009. "Noppa-portaali." Aalto yliopisto. [verkkosivu]. [Viitattu 23.08 2012] <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/mt-0.3211/luennot>.
- McGee, H. 2004. On Food and Cooking, The science and Lore of the Kitchen. New York: Scribner.
- Murkerjea, R., R.A. Murkerjea, ja J. F. Robyt. 2008. Starch biosynthesis: experiments on how starch granules grow in vivo. Ames: Laboratory of Carbohydrate Chemistry and Enzymology Department of Biochemistry, Biophysics, and Molecular Biology Iowa State University.
- Pietiko Oy. 2012. [verkkosivu]. [Viitattu 15. 07 2012]  
<http://www.pietiko.fi/pietiko/sovellus/Termopari.pdf>.
- RÖMPP. 2012, Ihre persönliche Enzyklopädie [online-palvelu, vaatii käyttäjätunnuksen]. [Viitattu 02. 08 2012] <http://www.roempp.com/prod/>.

- Saarela, A-M, S Määttä, P Hyvönen, ja A von Wright. 2005. Elintarvikeprosessit. Kuopio: Savonia,
- Sagacook. 2012. [verkkosivu]. [Viitattu 10.09. 2012]  
[http://www.sagacook.com/fi/Professionals/Pages/SAGACookingPaperRoll50m\[SCA\].aspx](http://www.sagacook.com/fi/Professionals/Pages/SAGACookingPaperRoll50m[SCA].aspx).
- Seinäjoen Vesi. 2012. [verkkosivu]. [Viitattu 01.09.2012]  
[http://www.seinajoenvesi.fi/usein\\_kysytyt.html](http://www.seinajoenvesi.fi/usein_kysytyt.html).
- Stable Micro Systems. 2011. Texture analysis software, Exponent, Users manual. London,
- Suomen Siemenperunakeskus. 2012. [verkkosivu]. [Viitattu 14. 08 2012]  
<http://www.spk.fi/index.php?id=203>.
- Tamro. 2012. Tamro käyttöturvallisuustiedotteet. [verkkosivu]. [Viitattu 12. 08 2012]  
<http://kayttoturvallisuustiedotteet.tamro.fi/webktt/frmPDF.aspx?id=119930>.
- The University of Arizona. 2007. Heat Transfer. [verkkosivu]. [Viitattu 15. 07 2012]  
<http://blowers.chee.arizona.edu/cooking/heat/potex.html>.
- TTL. 2012. Kansainväliset kemikaalikortit. [verkkosivu]. [Viitattu 09. 08 2012]  
<http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0167.htm>.
- Viikki Food Centre. 2007. "Perunat ja vihannekset kuorinta- ja paloitteluprosessissa." Viikki Food Centren oppaat. [verkkosivu]. [Viitattu 12. 07 2012]  
[http://www.viikkifoodcentre.fi/viikkifoodcentre/julkaisut/oppaat/fi\\_FI/oppaat/\\_files/11736978730003212/](http://www.viikkifoodcentre.fi/viikkifoodcentre/julkaisut/oppaat/fi_FI/oppaat/_files/11736978730003212/).
- Vreugdenhil, D. ja Bradshaw, J. 2007. Potato Biology and Biotechnology : Advances and Perspectives. Amsterdam: Elsevier.
- Winterthon, R. 2011 Thermopedia. [verkkosivu]. [Viitattu 8. 9 2012]  
<http://www.thermopedia.com/content/589/>.



## LIITTEET

### Liite 1: 10 minuutin keittojen rakenteiden vertailu

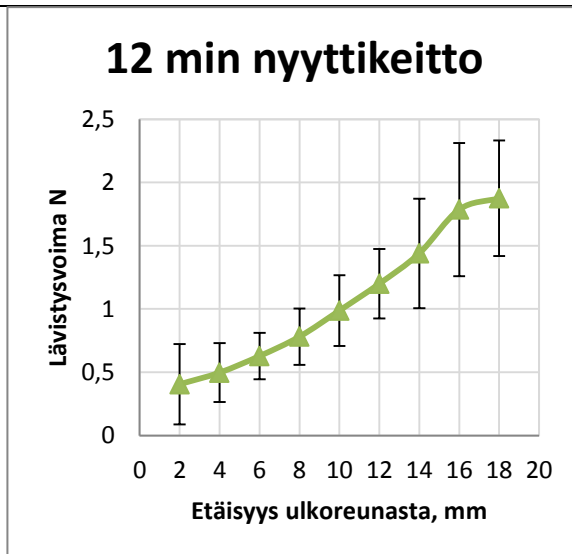
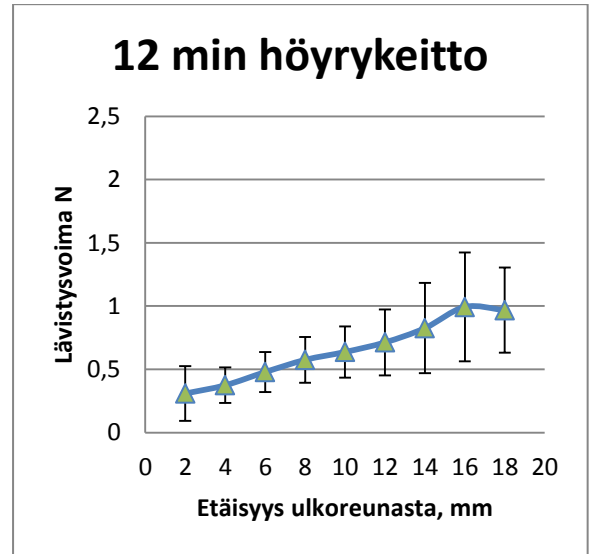
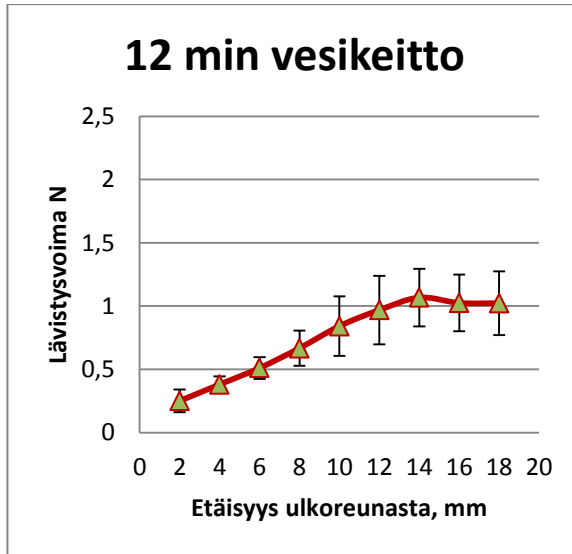


Kaavioissa esitetyt virhepalkit ovat keskihajonnan arvoja.

Höyry		Vesi		Nyytti	
keskih.	keskiv.	keskih.	keskiv.	keskih.	keskiv.
0,135	0,003	0,425	0,011	0,278	0,007
0,171	0,004	0,146	0,004	0,232	0,006
0,227	0,006	0,126	0,003	0,283	0,007
0,242	0,006	0,221	0,006	0,384	0,010
0,257	0,006	0,277	0,007	0,257	0,006
0,284	0,007	0,304	0,008	0,545	0,014
0,255	0,006	0,557	0,014	0,628	0,016
0,588	0,015	0,494	0,012	0,665	0,017
0,604	0,021	0,414	0,014	0,761	0,027

Kuvio 70: 10 minuutin keittojen rakenteiden vertailu ja tulosten keskihajonta

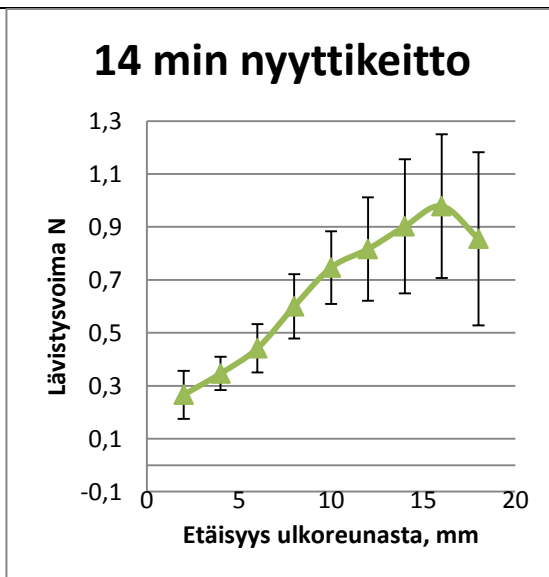
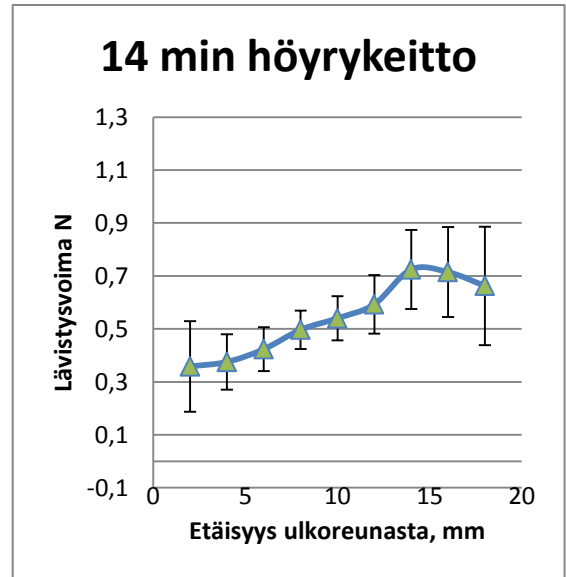
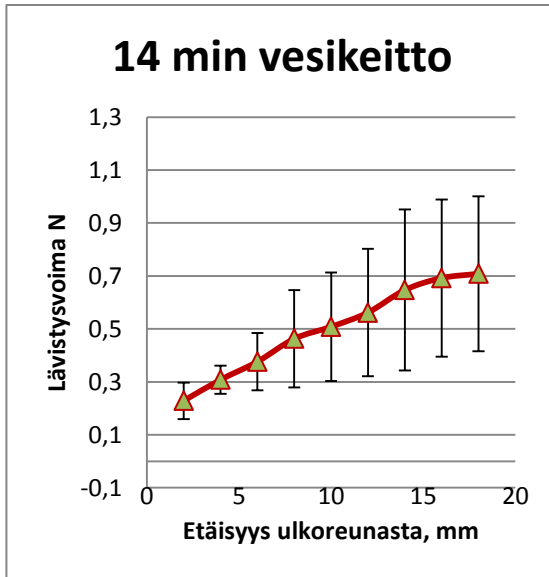
## Liite 2: 12 minuutin keittojen rakenteiden vertailu



Kaavioissa esitetyt virhepalkit ovat keskihajonnan arvoja.

mm	Höyry	Vesi	Nyytti	Höyry	Vesi	Nyytti
2	0,216	0,09	0,318	0,005	0,002	0,007
4	0,141	0,063	0,233	0,004	0,002	0,005
6	0,159	0,086	0,184	0,004	0,002	0,004
8	0,182	0,139	0,223	0,005	0,003	0,005
10	0,202	0,235	0,279	0,005	0,006	0,006
12	0,26	0,271	0,274	0,006	0,007	0,006
14	0,357	0,227	0,433	0,009	0,006	0,009
16	0,43	0,224	0,527	0,011	0,006	0,011
18	0,337	0,252	0,457	0,012	0,009	0,014

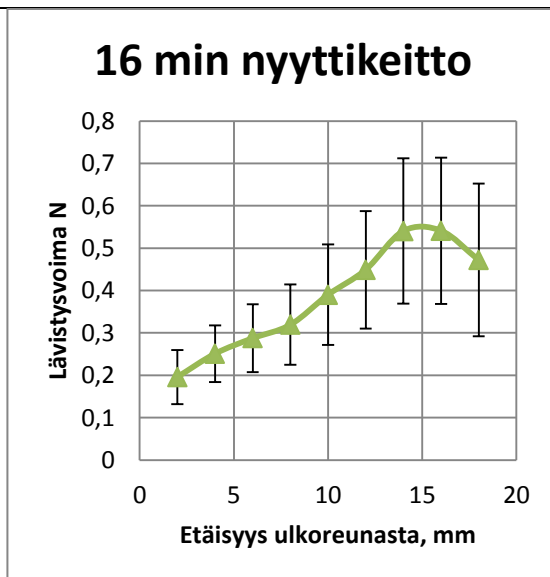
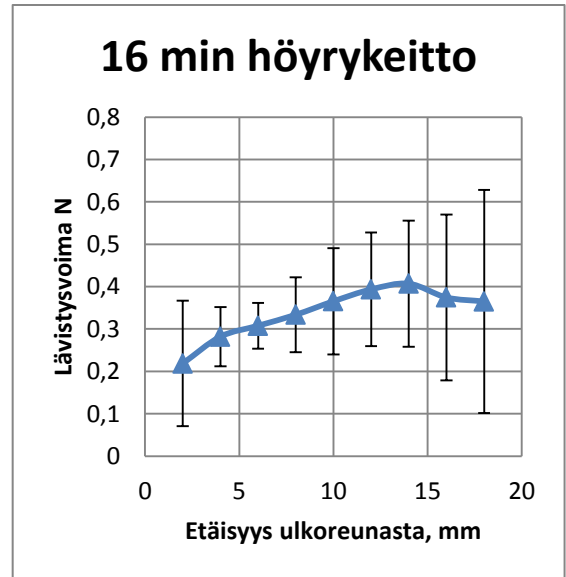
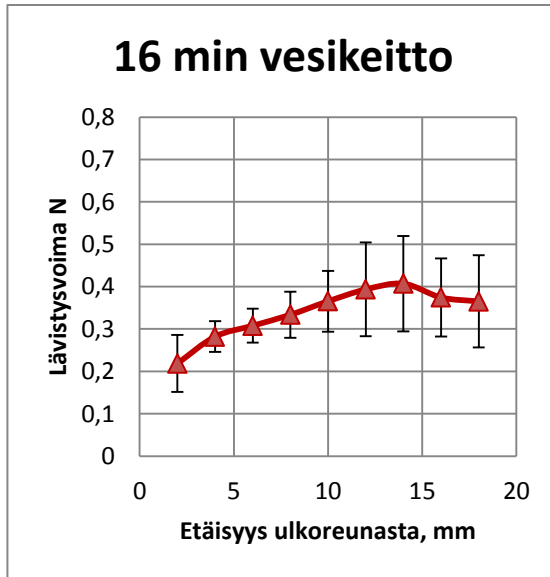
### Liite 3: 14 minuutin keittojen rakenteiden vertailu



Kaavioissa esitetyt virhepalkit ovat keskihajonnan arvoja, koska keskivirhe on hyvin pieni:

Höyry		Vesi		Nyytti	
keskih	keskiv	keskih	keskiv	keskih	keskiv
0,171	0,004	0,069	0,002	0,091	0,002
0,105	0,003	0,053	0,001	0,063	0,002
0,083	0,002	0,108	0,003	0,091	0,002
0,073	0,002	0,184	0,005	0,122	0,003
0,084	0,002	0,205	0,005	0,137	0,003
0,111	0,003	0,240	0,006	0,196	0,005
0,149	0,004	0,304	0,008	0,253	0,006
0,170	0,004	0,297	0,007	0,272	0,007
0,224	0,008	0,293	0,010	0,327	0,011

#### Liite 4: 16 minuutin keittojen rakenteiden vertailu



Kaavioissa esitetyt virhepalkit ovat keskihajonnan arvoja, koska keskivirhe on hyvin pieni:

Höyry	Höyry	Vesi	Vesi	Nyytti	Nyytti
keskih	keskiv	keskih	keskiv	keskih	keskiv
0,148	0,004	0,067	0,002	0,064	0,002
0,070	0,002	0,036	0,001	0,067	0,002
0,054	0,001	0,040	0,001	0,080	0,002
0,088	0,002	0,054	0,001	0,095	0,002
0,125	0,003	0,072	0,002	0,119	0,003
0,134	0,003	0,111	0,003	0,139	0,003
0,149	0,004	0,113	0,003	0,171	0,004
0,196	0,005	0,092	0,002	0,173	0,004
0,263	0,009	0,109	0,004	0,180	0,006

## Liite 5: Rakenteen muutosnopeudet

