



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ KOMERČNÍCH LITHIUM- IONTOVÝCH BATERIÍ A JEJICH VLASTNOSTÍ PŘI NÍZKÝCH TEPLOTÁCH

COMPARISON OF DIFFERENT TYPES OF COMMERCIAL LITHIUM-ION BATTERIES AND THEIR
PROPERTIES UNDER LOW TEMPERATURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Bičák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Libich, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Tomáš Bičák

ID: 155737

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání různých typů komerčních lithium-iontových baterií a jejich vlastností při nízkých teplotách

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se problematikou lithium-iontových baterií. Zaměřte se na jejich vývoj, technologii a používané materiály. Prostudujte jejich operační princip, charakteristické vlastnosti, výhody a nevýhody. Změřte charakteristické vlastnosti různých typů komerčních lithium-iontových baterií za standardních podmínek. Měření opakujte za snížené teploty a pozorujte vliv snížené teploty na charakteristiky lithium-iontové baterie. Porovnejte získané výsledky s hodnotami uváděnými výrobcí. Dle elektrochemických charakteristik jednotlivých typů lithium-iontových baterií (maximální vybíjecí/nabíjecí proud, jmenovitá kapacita a další typické parametry) rozhodněte, pro jaké aplikace jsou tyto články vhodné a v jaké aplikaci mohou být optimálně využity.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jiří Libich, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou lithium-iontových baterií. Popisuje vývoj, technologie a používané materiály. V diplomové práci je popsán operační princip, charakteristické vlastnosti, výhody a nevýhody. Práce je zaměřena na charakteristické vlastnosti komerčních lithium-iontových baterií za standardních podmínek a za snížené teploty. Za snížené teploty se pozorují změny vlastností vlivem nízkých teplot. Dále v této práci porovnávají naměřené hodnoty s hodnotami uváděnými výrobcí.

Klíčová slova

Lithium-ion, SEI, kapacita, nízká teplota, degradace, LTO, LiFePO₄

Abstract

The diploma thesis deals with the issue of lithium-ion batteries. Describes development, technologies and materials used. The diploma thesis describes the operating principle, characteristics, advantages and disadvantages. The work is focused on the characteristic properties of commercial lithium-ion batteries under standard conditions and at reduced temperatures. At reduced temperatures, changes in properties due to low temperatures are observed. Furthermore, in this work they compare the measured values with the values given by the manufacturers.

Keywords

Lithium-ion, SEI, capacity, low temperature, degradation, LTO, LiFePO₄

Bibliografická citace

BIČÁK, Tomáš. *Porovnání různých typů komerčních lithium-iontových baterií a jejich vlastností při nízkých teplotách* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142335>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Libich.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Bc. Tomáš Bičák*

VUT ID studenta: 155737

Typ práce: *Diplomová práce*

Akademický rok: 2021/22

Téma závěrečné práce: *Porovnání různých typů komerčních lithium-iontových baterií a jejich vlastností při nízkých teplotách*

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25.května 2022

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Libichovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Tomášovi Kazdovi, Ph.D. a panu Ing. Martinovu Šedinovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci

V Brně dne: 25.května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM GRAFŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD	14
CÍL PRÁCE	15
1. HISTORICKÝ VÝVOJ A PRINCIP FUNKCE	16
VLASTNOSTI PRIMÁRNÍCH A SEKUNDÁRNÍCH BATERÍ	17
PRIMÁRNÍ BATERIE	18
SEKUNDÁRNÍ BATERIE	19
<i>Olověná baterie</i>	19
<i>Ni-Cd baterie</i>	20
<i>NI-MH baterie</i>	21
<i>RAM baterie</i>	21
2. LITHIUM-IONTOVÉ BATERIE.....	22
POPIS LITHIUM-ION BATERÍ.....	22
PRINCIP FUNKCE LITHIUM-IONTOVÝCH BATERÍ.....	22
KLÍČOVÉ VLASTNOSTI.....	23
<i>Nevýhody lithium-iontových baterií</i>	23
<i>Výhody lithium-iontových baterií</i>	24
<i>Využití lithium-iont baterií</i>	24
<i>Jak pečovat a skladovat lithium-iontové baterie</i>	24
Z ČEHO SE SKLÁDÁ LITHIUM-IONTOVÁ BATERIE	25
<i>Separátor</i>	25
<i>Kladná elektroda</i>	25
<i>Záporná elektroda</i>	26
ELEKTROLYT	26
<i>Typy elektrolytů</i>	27
<i>Lithné soli</i>	28
<i>Rozpouštědla lithných solí</i>	30
OBAL LITHIUM-IONT BATERÍ.....	32
<i>Válcový obal</i>	33
<i>Prizmatický obal</i>	34
<i>Knoflíkový obal</i>	35
<i>Vakový obal</i>	35
METODY STÁRNUTÍ LITHIUM-IONT BATERÍ ZA SNÍŽENÉ TEPLoty	36
<i>Degradační vlivy za nízké teploty</i>	37
<i>Změny v materiálech</i>	39
<i>Proces stárnutí</i>	39
<i>Impedance anody</i>	39
<i>Pokovování anody</i>	40
<i>Změny ve struktuře</i>	40
<i>Cyklovatelnost lithiových iontů</i>	40

<i>Pasivační vrstva SEI</i>	40
ELEKTROCHEMICKÉ VLASTNOSTI	41
<i>Maximální nabíjecí proud</i>	41
<i>Optimální nabíjecí proud</i>	42
<i>Maximální vybíjecí proud</i>	42
<i>Optimální vybíjecí proud</i>	42
<i>Jmenovitá kapacita</i>	42
<i>Nominální napětí</i>	42
<i>Vnitřní odpor</i>	42
<i>Provozní teploty</i>	42
<i>Skladovací teploty</i>	42
<i>Samovybíjení</i>	43
<i>Životnost</i>	43
3. MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ	44
4. MĚŘENÍ BATERIÍ	45
MĚŘENÍ ZA POKOJOVÉ TEPLoty	45
<i>Goowei baterie</i>	45
<i>LGEB MHI 18650 baterie</i>	52
<i>GWL LTO baterie</i>	60
<i>LiFePO₄ baterie</i>	66
MĚŘENÍ ZA SNÍŽENÉ TEPLoty.....	73
<i>Goowei baterie</i>	73
<i>LGEB MHI 18650 baterie</i>	78
<i>GWL LTO baterie</i>	84
<i>LiFePO₄ baterie</i>	90
ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	93
<i>Baterie Goowei za pokojové teploty</i>	93
<i>Baterie LGEB MHI 18650 za pokojové teploty</i>	94
<i>Baterie LTO za pokojové teploty</i>	94
<i>Baterie LiFePO₄ za pokojové teploty</i>	94
<i>Baterie Goowei za snížené teploty</i>	94
<i>Baterie LGEB MHI 18650 za snížené teploty</i>	95
<i>Baterie LiFePO₄ za snížené teploty</i>	95
<i>Baterie LTO za snížené teploty</i>	95
5. ZÁVĚR	96
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	103
SEZNAM PŘÍLOH	104

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Vyobrazení Voltova sloupu [3]	16
Obrázek 1.2 Zjednodušený obrázek vybíjení olověné baterie [17].....	20
Obrázek 1.3 Řez válcovou baterií typu Ni-Cd [21].	21
Obrázek 2.1 Princip přenosu volných iontů [27].	23
Obrázek 2.2 Struktura válcové baterie [33].	34
Obrázek 2.3 Struktura prizmatické baterie [36].....	35
Obrázek 2.4 Nafouknutý vakový obal [34].....	36
Obrázek 2.5 Křivka zachování kapacity a míry stárnutí [39].	38
Obrázek 2.6 Záznam impedance a procentuálního nárůstu odporu [39].....	38
Obrázek 2.7 Složení vrstvy SEI [47].	41
Obrázek 3.1 Měřicí systém BCS-815	44
Obrázek 4.1 Impedanční charakteristika baterie LG v nabitém stavu	82
Obrázek 4.2 Impedanční charakteristika baterie LG za vybitého stavu.....	83
Obrázek 5.1 Impedanční charakteristika baterie LG za nabitého stavu	178
Obrázek 5.2 Impedanční charakteristika baterie LG za vybitého stavu.....	179

SEZNAM GRAFŮ

Graf 4.1 Nabíjecí cyklus (15) za pokojové teploty u baterie Goowei.....	46
Graf 4.2 Nábojová účinnost baterie 1 Goowei za pokojové teploty	46
Graf 4.3 Záznam kapacity a teploty u baterie 1 Goowei za pokojové teploty	47
Graf 4.4 Záznam teploty a kapacity u baterie 2 Goowei za pokojové teploty	48
Graf 4.5 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za pokojové teploty	48
Graf 4.6 Porovnání baterií Goowei za pokojové teploty.....	49
Graf 4.7 Zátěžové cyklování baterie 1 Goowei	49
Graf 4.8 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei	50
Graf 4.9 Překročení teploty u cyklování 3C u baterie 1 Goowei	50
Graf 4.10 Překročení teploty zátěžového cyklování 3C u baterie 2 Goowei	51
Graf 4.11 Ukázka cyklu (15) u baterie LG za pokojové teploty	53
Graf 4.12 Nábojová účinnost baterie 1 LG za pokojové teploty.....	54
Graf 4.13 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za pokojové teploty.....	54
Graf 4.14 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za pokojové teploty.....	55
Graf 4.15 Nábojová účinnost baterie 2 LG za pokojové teploty.....	56
Graf 4.16 Porovnání baterií LG za pokojové teploty.....	57
Graf 4.17 Zátěžové cyklování baterie 1 LG za pokojové teploty	58
Graf 4.18 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za pokojové teploty	58
Graf 4.19 Překročení teploty při zátěžovém cyklování baterie 2 LG.....	59
Graf 4.20 Ukázka cyklu (15) baterie LTO za pokojové teploty.....	62
Graf 4.21 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za pokojové teploty	62
Graf 4.22 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za pokojové teploty	63
Graf 4.23 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za pokojové teploty	63
Graf 4.24 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za pokojové teploty	64
Graf 4.25 Porovnání baterií LTO za pokojové teploty.....	65
Graf 4.26 Zátěžové cyklování baterie 2 LTO za pokojové teploty	65
Graf 4.27 Ukázka cyklu (15) baterie LiFePO ₄ za pokojové teploty	67
Graf 4.28 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO ₄ za pokojové teploty	67
Graf 4.29 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO ₄ za pokojové teploty	68
Graf 4.30 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO ₄ za pokojové teploty	68
Graf 4.31 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO ₄ za pokojové teploty	69
Graf 4.32 Porovnání baterií LiFePO ₄ za pokojové teploty	70
Graf 4.33 Zátěžové cyklování baterie 1 LiFePO ₄ za pokojové teploty.....	70
Graf 4.34 Zátěžové cyklování baterie 2 LiFePO ₄ za pokojové teploty	71
Graf 4.35 Nábojová účinnost baterie 1 Goowei za snížené teploty	73
Graf 4.36 Záznam teploty a kapacity baterie 1 Goowei za snížené teploty	74
Graf 4.37 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za snížené teploty	74
Graf 4.38 Záznam teploty a kapacity baterie 2 Goowei za snížené teploty	75
Graf 4.39 Porovnání baterií Goowei za snížené teploty	75
Graf 4.40 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei za snížené teploty	76
Graf 4.41 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za snížené teploty.....	78
Graf 4.42 Nábojová účinnost baterie 1 LG za snížené teploty.....	78
Graf 4.43 Nábojová účinnost baterie 2 LG za snížené teploty.....	79
Graf 4.44 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za snížené teploty.....	79
Graf 4.45 Porovnání baterií LG za snížené teploty.....	80
Graf 4.46 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za snížené teploty	80

Graf 4.49 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za snížené teploty	85
Graf 4.50 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za snížené teploty	85
Graf 4.51 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za snížené teploty	86
Graf 4.52 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za snížené teploty	86
Graf 4.53 Porovnání baterií LTO za snížené teploty	87
Graf 4.54 Zátěžové cyklování baterie 1 LTO za snížené teploty	88
Graf 4.55 Zátěžové cyklování baterie 2 LTO za snížené teploty	88
Graf 4.56 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO ₄ za snížené teploty	90
Graf 4.57 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO ₄ za snížené teploty	90
Graf 4.58 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO ₄ za snížené teploty	91
Graf 4.59 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO ₄ za snížené teploty	91
Graf 4.60 Porovnání baterií LiFePO ₄ za snížené teploty	92
Graf 4.61 Zátěžové cyklování baterie 2 LiFePO ₄ za snížené teploty	92
Graf 5.1 Ukázka cyklu (15) baterie Goowei za pokojové teploty	115
Graf 5.2 Záznam teploty a kapacity baterie 1 Goowei za pokojové teploty	116
Graf 5.3 Nábojová účinnost baterie 1 Goowei za pokojové teploty	117
Graf 5.4 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za pokojové teploty	118
Graf 5.5 Záznam teploty a kapacity baterie 2 Goowei za pokojové teploty	119
Graf 5.6 Porovnání baterií Goowei za pokojové teploty	120
Graf 5.7 Zátěžové cyklování baterie 1 Goowei za pokojové teploty	121
Graf 5.8 Překročení teploty baterie 1 Goowei při zátěži 3C za pokojové teploty	122
Graf 5.9 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei za pokojové teploty	123
Graf 5.10 Překročení teploty při zátěžovém cyklování baterie 2 Goowei	124
Graf 5.11 Ukázka cyklu (15) baterie Goowei za snížené teploty	125
Graf 5.12 Nábojová účinnost baterie 1 Goowei za snížené teploty	126
Graf 5.13 Záznam teploty a kapacity baterie 1 Goowei za snížené teploty	127
Graf 5.14 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za snížené teploty	128
Graf 5.15 Záznam teploty a kapacity baterie 2 za snížené teploty	129
Graf 5.16 Porovnání baterií Goowei za snížené teploty	130
Graf 5.17 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei za snížené teploty	131
Graf 5.18 Ukázka nabíjecího cyklu (15) baterie LG za pokojové teploty	132
Graf 5.19 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za pokojové teploty	133
Graf 5.20 Nábojová účinnost baterie 1 LG za pokojové teploty	134
Graf 5.21 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za pokojové teploty	135
Graf 5.22 Nábojová účinnost baterie 2 LG za pokojové teploty	136
Graf 5.23 Porovnání baterií LG za pokojové teploty	137
Graf 5.24 Zátěžové cyklování baterie 1 LG za pokojové teploty	138
Graf 5.25 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za pokojové teploty	139
Graf 5.26 Překročení teploty při zátěžovém cyklování 3C baterie LG	140
Graf 5.27 Ukázka cyklu (15) baterie LG za snížené teploty	141
Graf 5.28 Nábojová účinnost baterie 1 LG za snížené teploty	142
Graf 5.29 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za snížené teploty	143
Graf 5.30 Nábojová účinnost baterie 2 LG za snížené teploty	144
Graf 5.31 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za snížené teploty	145
Graf 5.32 Porovnání baterií LG za snížené teploty	146
Graf 5.33 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za snížené teploty	147
Graf 5.34 Ukázka cyklu (15) baterie LiFePO ₄ za pokojové teploty	148
Graf 5.35 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO ₄ za pokojové teploty	149

Graf 5.36 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO ₄ za pokojové teploty	150
Graf 5.37 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO ₄ za pokojové teploty	151
Graf 5.38 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO ₄ za pokojové teploty	152
Graf 5.39 Porovnání baterií LiFePO ₄ za pokojové teploty	153
Graf 5.40 Zátěžové cyklování baterie 1 LiFePO ₄ za pokojové teploty	154
Graf 5.41 Zátěžové cyklování baterie 2 LiFePO ₄ za pokojové teploty	155
Graf 5.42 Ukázka cyklu (15) baterie LiFePO ₄ za snížené teploty	156
Graf 5.43 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO ₄ za snížené teploty	157
Graf 5.44 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO ₄ za snížené teploty	158
Graf 5.45 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO ₄ za snížené teploty	159
Graf 5.46 Porovnání baterií LiFePO ₄ za snížené teploty	160
Graf 5.47 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO ₄ za snížené teploty	161
Graf 5.48 Zátěžová charakteristika baterie 2 LiFePO ₄ za snížené teploty	162
Graf 5.49 Ukázka cyklu (15) baterie LTO za pokojové teploty	163
Graf 5.50 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za pokojové teploty	164
Graf 5.51 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za pokojové teploty	165
Graf 5.52 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za pokojové teploty	166
Graf 5.53 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za pokojové teploty	167
Graf 5.54 Porovnání baterií LTO za pokojové teploty	168
Graf 5.55 Zátěžové cyklování baterie 2 LTO za pokojové teploty	169
Graf 5.56 Ukázka cyklu (15) baterie LTO za snížené teploty	170
Graf 5.57 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za snížené teploty	171
Graf 5.58 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za snížené teploty	172
Graf 5.59 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za snížené teploty	173
Graf 5.60 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za snížené teploty	174
Graf 5.61 Porovnání baterií LTO za snížené teploty	175
Graf 5.62 Zátěžové cyklování baterie 1 LTO za snížené teploty	176
Graf 5.63 Zátěžová charakteristika baterie 2 LTO za snížené teploty	177

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Porovnání typů primárních baterií [12];[13];[14];[15].....	18
Tabulka 2.1 Porovnání anodových materiálů v li-ion bateriích [27].	26
Tabulka 2.2 Vlastnosti LiClO ₄ [27].....	29
Tabulka 2.3 Vlastnosti LiBF ₄ [27].	29
Tabulka 2.4 Vlastnosti LiPF ₆ [27].....	29
Tabulka 2.5 Vlastnosti NaClO ₄ [27].	30
Tabulka 2.6 Vlastnosti sulfolanu [27].	30
Tabulka 2.7 Vlastnosti propylen karbonátu [27].....	31
Tabulka 2.8 Vlastnosti ethylen karbonátu [27].	31
Tabulka 2.9 Vlastnosti dimethyl sulfoxidu [27].....	32
Tabulka 2.10 Vlastnosti dimethyl karbonátu [27].	32
Tabulka 4.1 Údaje udávané k baterii Goowei.....	45
Tabulka 4.2 Přehled naměřených hodnot u baterií Goowei za pokojové teploty.....	52
Tabulka 4.3 Údaje udávané výrobcem k baterii LGEB.	53
Tabulka 4.4 Přehled naměřených hodnot u baterií od LG za pokojových teplot.	60
Tabulka 4.5 Údaje udávané výrobcem baterie LTO	61
Tabulka 4.6 Porovnání naměřených hodnot baterií GWL za pokojové teploty.	66
Tabulka 4.7 Údaje udávané výrobcem baterie LiFePO ₄	66
Tabulka 4.8 Tabulka naměřených hodnot baterií typu LiFePO ₄ za pokojových teplot.	72
Tabulka 4.9 Porovnání naměřených hodnot za snížené teploty u baterií Goowei.	77
Tabulka 4.10 Porovnání naměřených hodnot baterií LG za nízké teploty.	81
Tabulka 4.11 Porovnání dat z impedanční spektrometrie za nabitého stavu	84
Tabulka 4.12 Porovnání dat z impedanční spektrometrie za vybitého stavu	84
Tabulka 4.13 Porovnání naměřených hodnot baterie LTO za nízké teploty.	89
Tabulka 4.14 Porovnání naměřených hodnot baterií typu LiFePO ₄ za nízkých teplot.	93
Tabulka 5.1 Porovnání naměřených hodnot za pokojové teploty u baterií Goowei.....	108
Tabulka 5.2 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u baterií Goowei.....	109
Tabulka 5.3 Porovnání naměřených hodnot za pokojové teploty u baterií LGEB.....	110
Tabulka 5.4 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u baterií LGEB.....	111
Tabulka 5.5 Vybraná data z impedanční spektrometrie v nabitém stavu.....	111
Tabulka 5.6 Vybraná data z impedanční spektrometrie za vybitého stavu	112
Tabulka 5.7 Porovnání naměřených hodnot za pokojové teploty u LiFePO ₄	112
Tabulka 5.8 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u LiFePO ₄	113
Tabulka 5.9 Porovnání naměřených hodnot baterií LTO.....	113
Tabulka 5.10 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u LTO.....	114

ÚVOD

Moderní doba je plná elektroniky, zařízení, které potřebují zdroj elektrické energie. Jako zdroj elektrické energie se předpokládá připojení zařízení do elektrické sítě. V neposlední řadě jsou tu zařízení, které se řadí do kategorie přenositelné elektroniky. Pro tuto elektroniku je potřebné vyvíjet nové a nové technologie pro výrobu nových zdrojů elektrické energie, které by dokázaly tuto elektroniku udržet co nejdéle v provozu.

V současné době se také rozvíjí automobilový průmysl, kdy automobily jezdí na elektrickou energii. Tyto zdroje pro přenositelnou elektroniku nacházejí i zde své uplatnění. Těmto zdrojům se obecně říká baterie.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. První kapitola pojednává o historickém vývoji a principu baterie. Druhá kapitola se zabývá lithium - iontovými bateriemi. V textu bude název lithium-iont nahrazen zkratkou li-ion. Třetí kapitola se zabývá popisem měřicího přístroje. Čtvrtá kapitola se zabývá samotným měřením komerčních baterií. Poslední kapitola této diplomové práce se zabývá zhodnocením a závěrem.

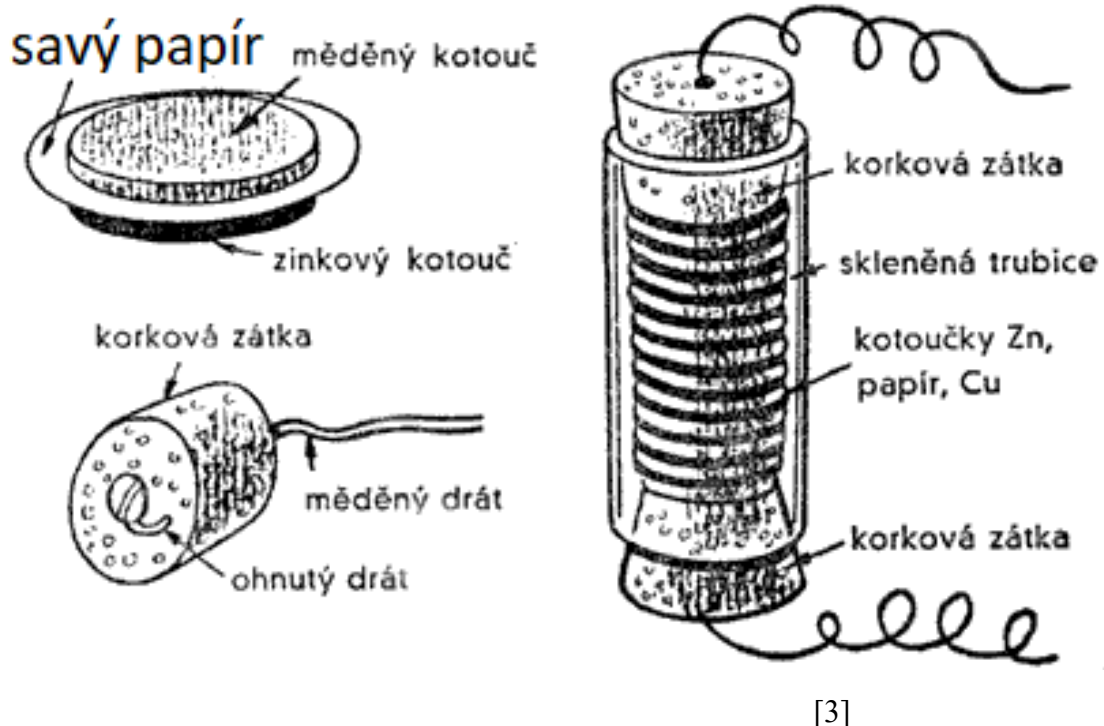
CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo proměřit komerční typy li-ion baterií při pokojové teplotě a při nízké teplotě. Pokojová teplota byla definována teplotou od 20 °C do 25 °C. Nízká teplota byla nastavena na -5 °C. Baterie při nízké teplotě byly proměřeny v klimatické komoře. Na bateriích byla provedena sada měření 200 cyklů při nabíjení 0,5 C a vybíjení při 0,5 C. Dále bylo provedeno měření 5 cyklů při nabíjení 0,5 C a vybíjení bude proudy 1 C, 2 C a 3 C. Tyto sady měření byly provedeny jak pro pokojové teploty, tak i pro nízké teploty. Po měření byly naměřené výsledky porovnávány s hodnotami, které jsou uvedeny výrobcem baterií. Po vyhodnocení základních parametrů byly stanoveny aplikace, kde se tyto baterie optimálně uplatní.

1. HISTORICKÝ VÝVOJ A PRINCIP FUNKCE

Historie baterií sahá do roku 1791. V tomto roce italský vědec Luigi Galvani zjistil při svých pokusech, které byly prováděny na žábách, že dochází ke smršťování svalů, a to při kontaktu s různými kovy. Tento jev si Galvani vyložil tak, že se jedná o takzvanou živočišnou energii. Předpokládal, že nervy jsou kladným pólem a svaly jsou záporným pólem. Ke stažení svalů mělo docházet spojením těchto dvou pólů kovovým předmětem. Jevo, který Galvani pozoroval později správně vysvětlil Alessandro Volta. Volta předpokládal, že elektrické napětí vzniká mezi dvěma kovy, které jsou spojeny vodivým elektrolytem [1;2].

Na počátku 19. století sestavil Volta první baterii, která vycházela z pokusů Galvaniho. Tato baterie je označována jako Voltův sloup a je považována za první elektrochemický zdroj proudu. Voltův sloup je vyobrazen na *obrázku 1.1*. Voltův sloup je složen ze zinkových a měděných desek. Tyto desky byly ponořeny do zředěné kyseliny sírové. Desky byly od sebe odděleny plstí, která byla namočená do kyseliny sírové [1].



Pro to, aby byla vytvořena baterie, tak je zapotřebí mít dva rozdílné kovy a elektrolyt. Elektrolytem se myslí tekutina, která obsahuje ionty. Tyto kovy se v bateriích nazývají anoda a katoda. Anoda a katoda je v baterii obklopena elektrolytem. Elektrolyt díky tomu, že obsahuje ionty, tak dokáže vést elektrický proud. Elektrické napětí je dáno rozdílem elektrických potenciálů na elektrodách [4].

Na katodě dochází k redukci neboli k pohlcení elektronů a u anody je to právě naopak. U anody dochází k oxidaci, a tím k získávání elektronů. Když se ponoří kovový plech do kapaliny, která obsahuje ionty, tak atomy kovů budou vystupovat v podobě iontů do kapaliny a v opačném případě se ionty z kapaliny budou zachytávat na kovovém plechu. Tyto jevy závisí na energii vodivostních elektronů v krystalové mřížce kovu. Pokud se do kapaliny ponoří dva stejné plechy, tak se oba nabíjí stejně a nevznikne mezi nimi žádné napětí [4].

Vlastnosti primárních a sekundárních baterií

Elektrochemické baterie se dělí na primární a sekundární baterie. Mezi primárními a sekundárními bateriemi je několik rozdílů. Základním rozdílem je to, že sekundární baterie lze nabíjet. U primárních baterií jsou elektrochemické děje nevratné. Základní vlastnosti mají primární a sekundární baterií stejné, tudíž se dají charakterizovat stejnými veličinami. Základní veličiny, které se udávají u baterií je napětí, objemová kapacita, měrná kapacita a nominální kapacita. U sekundárních baterií se uvádí ještě životnost. Baterie díky tomu, že jsou to elektrochemické zdroje energie, tak obsahují některé jedovaté látky jako je například olovo, kobalt, nikl a další. Tyto látky jsou jedovaté a škodí životnímu prostředí i lidem. V dnešní době se baterie používají ve všech přenosných zařízeních a některé baterie se používají ve speciálních aplikacích [2].

Základní veličinou je napětí baterie. Toto napětí se dělí na jmenovité a skutečné. Jmenovité napětí je napětí, které je uváděno na baterii a jedná se průměrnou hodnotu napětí při vybíjení baterie za standardních podmínek. Skutečné napětí je napětí, které se měří na svorkách baterie. Toto napětí se mění podle stavu nabití a podle okolních podmínek jako je teplota, vlhkost a velikost proudu, který protéká baterií [6].

Objemová kapacita je podíl kapacity baterie na jejím objemu a vyjadřuje se v ampérhodinách na kubický decimetr (Ah/dm^3) [7].

Kapacita je základní veličinou. Jednotkou kapacity je ampérhodina, která má zkratku Ah. Na některých bateriích lze nalézt napsanou kapacitu v mAh. Kapacita baterie je množství elektrického náboje, který je baterie schopna dodat během vybíjení [8].

Životnost baterie je schopnost baterie znovu opětovného nabití, než se u nich projeví pokles kapacity baterie. Životnost se uvádí u sekundárních baterií. U primárních baterií se neudává, z toho důvodu, že primární baterie nelze znovu nabíjet [9].

Primární baterie

Primární baterie jsou elektrochemické zdroje elektrického napětí. Oproti sekundárním bateriím nelze primární baterie nabíjet. Jakmile tyto baterie se vybijí, tak se musí následně likvidovat. Baterie primárního typu se vyrábějí v různých formátech. Například válcový, plochý a knoflíkový formát. Nejčastějším a nejznámějším formátem primární baterie je knoflíkový formát. Primární baterie jsou převážně vyráběny ve formě takzvaných suchých baterií. U suchých baterií je elektrolyt obsažen v absorpčním materiálu, který odděluje elektrody. Velkou výhodou primárních baterií je, že jejich pořizovací cena je velice nízká, mají dobrou trvanlivost, vysokou energetickou hustotu a minimální až nulovou nutnost údržby. Primární baterie nachází uplatnění hlavně v přenosných zařízeních, hračkách, osvětlení, hodinkách, zálohování paměti a také především ve speciálních vojenských aplikacích [10].

Nejznámější primární baterií je Laclanchéova baterie. Základní princip Laclanchéové baterie byl objeven v roce 1866 vynálezcem Georgem Leclanchém. Tato baterie se následně vylepšoval a jeho nejnovějším vylepšením je zinkochloridová baterie, ale s odlišným typem použitého elektrolytu. V roce 1899 byl objeven alkalický typ baterie a je to novější typ baterie. Nejnovějším typem baterie v primárních bateriích jsou lithiové baterie, které byly vytvořeny v roce 1970. Lithiové baterie primárního typu dosahují největších hodnot gravimetrické hustoty energie. Lithiové baterie jsou dále popsány v kapitole Lithium-iontové baterie V následující tabulce 1.1 je porovnání typů primárních baterií. Jako malý vybíjecí proud se myslí v tabulce maximálně 1 A. Efektivita je v tabulce myšlena jako nábojová účinnost baterie [10;11].

Tabulka 1.1 Porovnání typů primárních baterií [12;13;14;15].

Typ	Napětí [V]	Měrná kapacita [mAh]	Vybíjecí proud	Efektivita [%]	Životnost [let]
Zn-C	1,5	600–800	Malý	75	2
Alkalické	1,5	700–3000	Malý	73	7
Lithiové	1,5 – 3,7	1200–3400	Střední	80	15

Sekundární baterie

Stejně jako primární elektrické zdroje energie jsou sekundární baterie označovány jako baterie. Základním rozdílem oproti primární baterii je možnost opětovného nabíjení baterie po jeho vybití. Opětovné nabíjení je schopnost přijetí elektrické energie z vnějšího zdroje energie. Tato energie se akumuluje na elektrodách jako chemická energie. Jako u primární baterie při vybíjení sekundárních baterií dochází ke změnám chemického složení v elektrodách, ale na rozdíl od primárních baterií, sekundární baterie je chemická reakce vratná při přiložení vnějšího napětí. Sekundární baterie se neustále rozvíjí stejně jako primární baterie děle jak 100 let. Jako nejstarší zástupce sekundární baterie je olověná baterie, která byla objevena Gastorem Plantém a to v roce 1859 [11;16].

V dnešní době jsou sekundární baterie používány ve velké škále aplikací, ale hodně záleží na jejich elektrochemickém složení a hmotnosti. Nejčastěji se používají nikl-kadmiové, nikl-metallhybridové a li-ion baterie v malých pouzdech v počítačích nebo v mobilních telefonech. Olověné a li-ion baterie se používají ve startovacích bateriích v automobilovém průmyslu dále pro pohon hybridních a elektrických vozidel. Nakonec se tyto baterie používají ve velkých stacionárních bateriích, které jsou určeny ke skladování energie, která je přebytečná v dodavatelské síti [11;16].

Základní zástupci sekundárních baterií jsou olověné baterie, nikl-kadmiové baterie, nikl-metallhybridové baterie a v poslední době li-ion baterie. Nikl-kadmiové baterie budou nahrazeny dále v textu zkratkou Ni-Cd a baterie nikl-metallhybrid zkratkou Ni-MH. Nové generace lithium-iontových baterií se budou používat ve vysokonapěťových lithium - iontových bateriích, nebo lithium-síra baterie a v poslední řadě lithium-vzduch baterie [11;16].

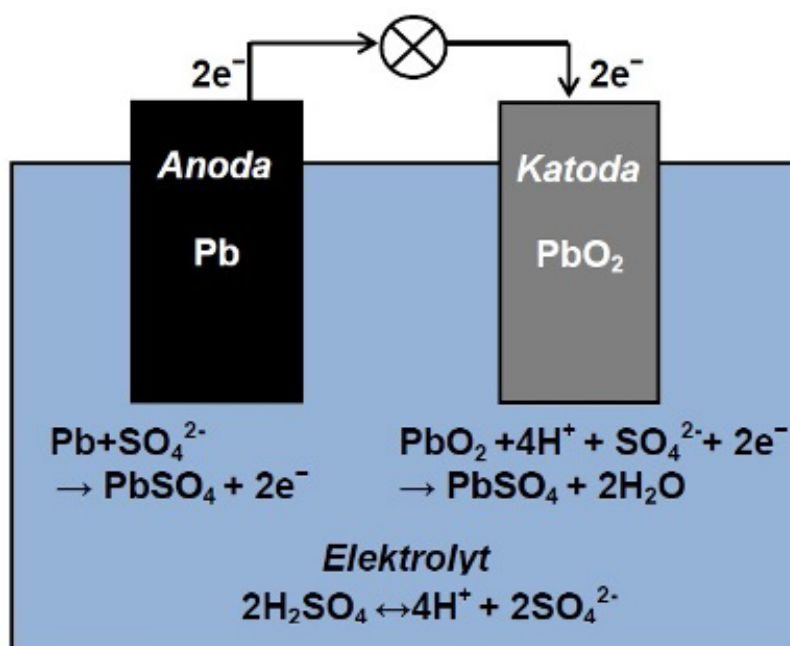
Olověná baterie

Olověná baterie je nejstarším zástupcem sekundárních baterií. Tato baterie byla vynalezena v roce 1859 a oficiálně byl představen svým vynálezcem Gastonem Plantém na Francouzské akademii věd v roce 1860. Tyto baterie díky svému složení, nízkému vnitřnímu odporu a výdrži se nejčastěji používají v automobilovém průmyslu. Také se tyto baterie dají využít v záložních systémech. Olověné baterie mají řadu nevýhod. Jednou z nejzásadnějších nevýhod je to, že jsou těžké a olovo s kyselinou sírovou je jedovaté a bohužel jak kyselina, tak i olovo nejsou šetrné k životnímu prostředí [11;17;18].

Jelikož se tyto baterie nejdéle využívají, tak jsou cenově přijatelné. Díky těmto cenám se tyto baterie stále využívají, ale v současné době se nahrazují jinými elektrotechnickými bateriemi, a to nejčastěji li-ion bateriemi. Olověné baterie je nutné skladovat v nabitém stavu. Pokud se olověná baterie bude skladovat v nenabitém stavu, tak může dojít k takzvané sulfuraci. Sulfurace znamená, že se zvětšuje vnitřní odpor a v důsledku toho se začnou tvořit krystaly síranu olovnatého. Při nabíjení lze částečně, ale obtížně

přeměnit tyto krystaly zase na olovo, kyselinu sírovou a oxid olovnatý. V některých případech mohou tyto krystaly dorůst takových velikostí, že mohou způsobit zkrat na deskách a deformaci. Bohužel sulfuraci nelze zamezit, ale v některých případech při nabíjení nízkým proudem lze částečně sulfuraci korigovat [11;17;18].

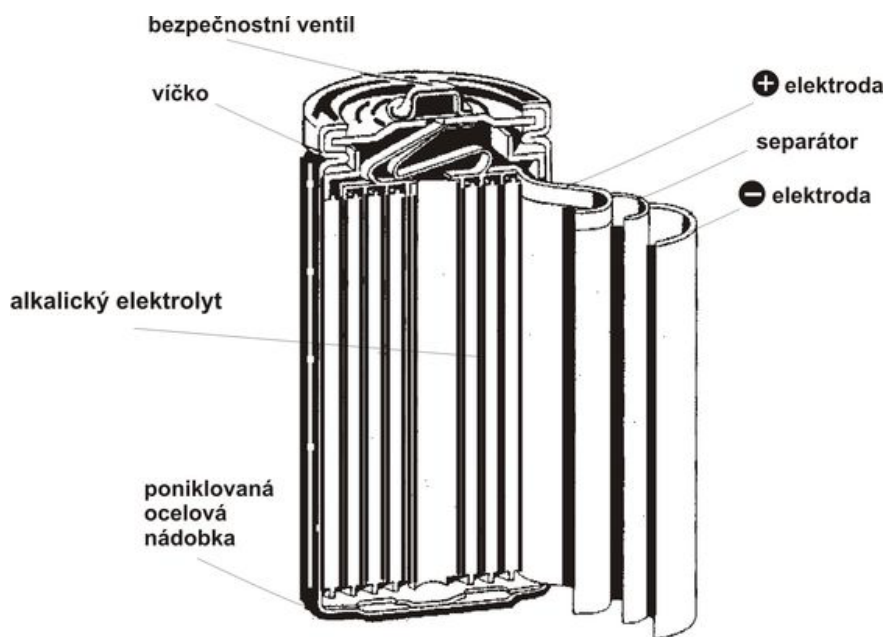
Další jev, který může nastat u olovených baterií je takzvané odlupování. Odlupování může nastat právě při přebíjení nebo při nadměrného cyklování. Může dojít právě k ztrátě nebo k snížení vrstvy olova. Bohužel odlupování nejde zabránit a je to nevratný jev. Na obrázku 1.2 je znázorněn proces vybíjení olovené baterie [11;17;18].



Obrázek 1.2 Zjednodušený obrázek vybíjení olovené baterie [17].

Ni-Cd baterie

Další zástupce sekundárních baterií je Ni-Cd baterie. Tato baterie se vyznačuje tím, že se může skladovat ve vybitém stavu a je odolná proti hloubkovému vybití. U typu Ni-Cd je hlavní nevýhoda oproti bateriím typu Ni-MH a li-ion to, že disponuje menší měrnou kapacitou. Další nevýhodou je, že tato baterie obsahuje jedovaté kadmium, a proto je ekologicky nebezpečná. Baterie Ni-Cd disponují jmenovitým napětím 1,2 V. V případě, kdy jsou plně nabité, tak mají 1,35 V. Pokud se tyto baterie pořádně vybijí, tak disponují maximálním napětím, které se pohybuje mezi 0,8 V až 1 V. Skladování těchto baterií se doporučuje mezi teplotami od 5 °C do 25 °C. Pokud se tyto baterie dlouho skladovaly, tak se je doporučuje před prvním použitím minimálně 2x nabít. Nevýhodou baterií typu Ni-Cd je to, že u nich dochází k samovybití. Na obrázku 1.3 je zobrazena baterie Ni-Cd v řezu. Jedná se o baterii válcového typu [11;19;20].



Obrázek 1.3 Řez válcovou baterií typu Ni-Cd [21].

NI-MH baterie

Baterie typu Ni-MH se považuje za nástupce baterie typu Ni-Cd. U těchto baterií byly vylepšeny parametry. Tyto baterie dosahují větších kapacit a už nejsou tak ekologicky nebezpečné. U těchto baterií se používá jako anodový materiál nikl-metalhydrid nebo nikl - lanthanum. Katodový materiál je oxid niklu. Další součástí této baterie je elektrolyt. Jako elektrolyt se zde nejčastěji používá hydroxid draselný. Baterie typu Ni-MH mají jmenovité napětí 1,2 V. Při plném nabití tyto baterie dosahují napětí 1,4 V akdyž jsou vybité, jejich napětí je 1 V. Hlavní nevýhodou tohoto typu baterií je, že se samovolně vybíjí, a to přibližně mezi 15 % až 30 % za měsíc za normálních pokojových teplot [11;15;22;23;24].

RAM baterie

Dalším zástupcem je RAM baterie. Tato zkratka znamená Rechargeable Alkaline Manganese. Jsou to primární baterie alkalického typu. Do alkalických baterií patří také Ni-Cd, Ni-MH a lithiové baterie. Nabíjecí alkalické baterie jsou na bázi oxidu manganičitého (MnO_2). Baterie mají maximální dobu životnosti skladování až 7 let a maximální vydrží 500 cyklů. Jejich maximální nabíjecí proud je 1 A. Oproti ostatním druhům sekundárních baterií mají nízké samovybíjení a větší jmenovité napětí. Toto napětí je 1,5 V. Baterie alkalického typu se hodí díky svému maximálnímu proudu jen do zařízení, které mají malý proudový odběr [25].

2. LITHIUM-IONTOVÉ BATERIE

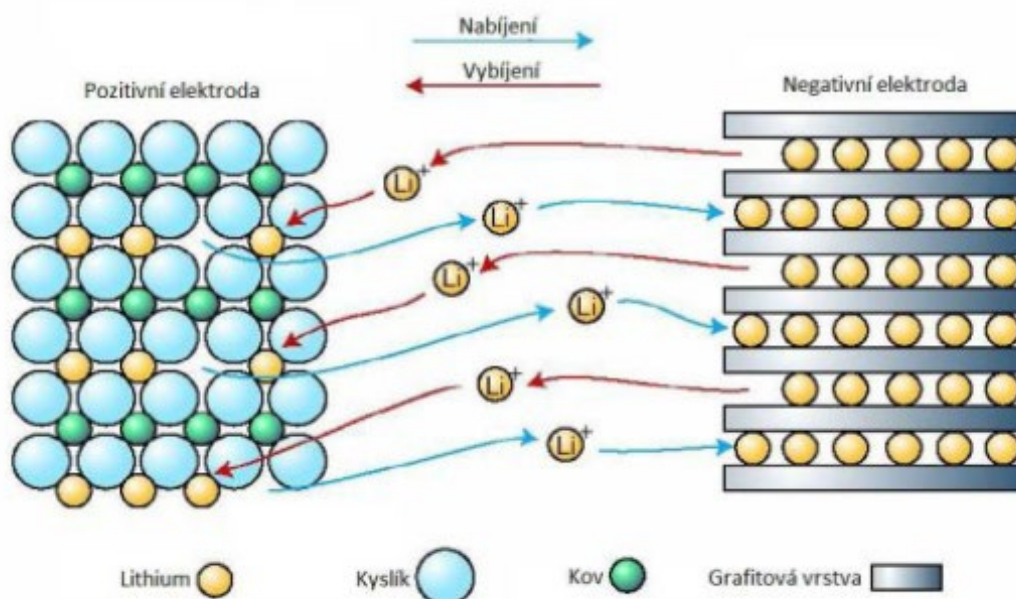
Li-ion baterie se začaly poprvé objevovat v 60. letech 20. století. Na trhu jsou li-ion baterie už od roku 1991. V tomto roce byly poprvé použity v komerčních aplikacích a staly se žádanějšími pro velké spektrum aplikací. Využívají se od přenosné elektroniky přes automobilový průmysl až po stacionární uložení energie. Nejdříve se objevily jako primární baterie, které se vyznačovaly velmi nízkým samovybíjením, snadnou výrobitelností v podobě sekundárních baterií. Oproti ostatním typům elektrochemických zdrojů se vyznačovaly vysokou měrnou energií a kapacitou. Výhodám li-ion baterií se věnuje podkapitola: Klíčové vlastnosti, kde je soupis také nevýhod li-ion baterií, využití li-ion baterií a také jak pečovat a skladovat li-ion baterie. V 70. letech byly provedeny různé pokusy, které nepřinesly uspokojivé výsledky. Tyto neúspěchy byly převážně spojeny s výběrem materiálů pro elektrody. Elektrodám se věnuje podkapitola: Z čeho se skládá lithium-iontová baterie kde mimo elektrod je popsán i separátor. Během pokusů docházelo ke korozi a k pasivaci elektrod. Pasivace elektrod je popsána v podkapitole: Metody stárnutí lithium-iontových baterií. Pasivace elektrod je spojena s elektrolytem a s rozpouštědlem. Elektrolyt a rozpouštědla jsou popsány v podkapitole: Elektrolyt.

Popis lithium-ion baterií

Li-ion baterie se v dnešní době řadí mezi nejvíce používané sekundární baterie. Tyto baterie se používají nejčastěji v přenosné elektronice a v poslední době se tyto baterie také objevují v automobilovém průmyslu, v bateriích elektrických vozidel. Mimo jiné tyto baterie se také využívají i v jiných aplikacích. Li-ion baterie dosahují poměrně vysokého napětí na baterii a toto napětí se pohybuje okolo 3,7 V na baterii. Další jejich hlavní výhodou je, že mají vysoký počet nabíjecích tak i vybíjecích cyklů [26].

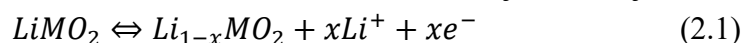
Princip funkce lithium-iontových baterií

Li-ion baterie se skládá z dvou kolektorů. Tyto kolektory jsou vyrobeny z mědi a hliníku. Na anodě se používá také grafit. Právě od anody do katody se pohybují ionty lithia. Toto se děje při nabíjení baterie. Při vybíjení je to naopak. Ionty lithia se pohybují od katody k anodě. Další součástí baterie je elektrolyt. Tento elektrolyt je vodivý jen pro ionty lithia. Pro elektrony je nevodivý. Další nedílnou součástí baterií je separátor, který slouží v baterii jako oddělovač elektrod. Na obrázku 2.1 je znázorněno, jak probíhá nabíjení a vybíjení li-ion baterie [26;27].

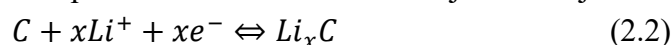


Obrázek 2.1 Princip přenosu volných iontů [27].

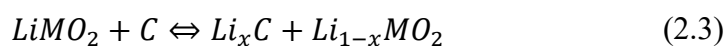
Proudová rovnice, která probíhá na kladné elektrodě li-ion baterie je následující:



Proudová rovnice, která probíhá na záporné elektrodě li-ion baterie je následující:



Vzniklá reakce je:



Jako katodový materiál byl zvolen v rovnicích $LiMO_2$, který představuje oxidy kovů. Anodovým materiálem byl zvolen jako příklad $LiCoO_2$ a Li_xC . Z rovnic, které zde byly uvedeny, tak z nich vyplývá, že elektrolyt slouží jen jako iontový vodič a nevstupuje do žádné z těchto reakcí [11].

Klíčové vlastnosti

Nevýhody lithium-iontových baterií

Jako každá baterie, tak li-ion baterie mají také své nevýhody. Mezi jejich hlavní nevýhody patří, že se baterie musí nabíjet konstantním proudem a tento proud je omezen. Další nevýhodou je, že baterie rychle stárnou a to znamená, že po dobu životnosti 2 až 3 let ztratí přibližně 20 % své kapacity při pokojové teplotě. Mají nízký vybíjecí proud a při vybití dochází bohužel k poklesu napětí na baterii. Dále mají velký vnitřní odpor. Jejich pracovní teplota se nesmí pohybovat pod $-20\text{ }^\circ\text{C}$. Další nevýhodou je, že tyto baterie se nesmí vybit pod stanovenou hodnotu napětí, protože by se tyto baterie staly nepoužitelnými (trvale zničeny), proto je nutné mít řídicí elektroniku. Poslední nevýhoda je, že nelze tyto baterie nabíjet na jiných nabíjecích stanicích, to znamená, že nabíjecí stanice musí umět nabíjet právě tyto baterie [27].

Výhody lithium-iontových baterií

Oproti ostatním typům elektrochemických zdrojů, li-ion baterie mají řadu výhod. Mezi hlavní výhodou těchto baterií patří, že mají vysoké jmenovité napětí a to 3,6 V. Mají vysokou energetickou hodnotu, nízkou hmotnost a jsou hlavně bezúdržbové. U komerčních baterií lze je používat ve velkém teplotním rozsahu, a to přibližně od -20 °C do 60 °C. Další jejich nespornou výhodou je, že mohou mít různé typy obalů, které jsou popsány v podkapitole: Obal lithium-iontových baterií. Proto tyto baterie lze využívat v zařízeních, kde je nutnost přizpůsobit velikost a tvar baterie jako jsou mobilní telefony, notebooky a další zařízení. Další výhodou je, že mají dobrou nabíjecí účinnost a ta se pohybuje mezi 80 % až 90 %. Nespornou výhodou li-ion baterií je, že nemají paměťový efekt a jejich samovybití se pohybuje okolo 8 % za měsíc při teplotě 20 °C. Baterie lze bezpečně převážet bez žádného omezení. Poslední výhodou je, že tyto baterie nejsou nebezpečné pro životní prostředí, protože neobsahují olovo, kadmium nebo rtuť a v poslední době se výrobci zaměřují na nahrazení nebezpečných látek za bezpečné [27].

Využití lithium-iontových baterií

Li-iontová baterie mají v dnešní době velké uplatnění od přenositelné elektroniky až po stacionární baterie a také v automobilovém průmyslu. Jelikož se dnešní elektronika čím dál tím víc zmenšuje, kladou se velké nároky na baterie, a právě zde najdou uplatnění li-iontová baterie, které mají velkou energetickou kapacitu.

Cena li-iontových baterií v poslední době klesá a tím napomáhá k tomu, aby tyto baterie se používaly i v odvětví jako je automobilový průmysl nebo přesněji vývoj a výroba elektromobilů. V tomto odvětví se tyto baterie nejvíce využívají kvůli své hmotnosti a bezpečnosti.

V neposlední řadě se li-iontová baterie používají jako úložiště elektrické energie v domácnostech nebo v průmyslu. Jelikož li-iontová baterie dosahují stejných kvalit jak olovené baterie, tak je i v některých aplikacích začínají nahrazovat. V současné době lze najít baterie, které svým vzhledem připomínají právě olovené baterie, ale jsou to baterie, které se skládají právě z li-iontových baterií přesněji ze LiFePO₄ baterií.

Jak pečovat a skladovat lithium-iontovou baterii

Li-iontová baterie lze skladovat v rozmezí teplot a to od 0 °C do 25 °C. Rozsah teplot, ve kterých lze baterie skladovat se ve většině případů najdou v technických místnostech. Baterie by se měly skladovat přibližně na 50 % nabití a před použitím by se měly baterie nabít na plnou kapacitu a tímto se dá prodloužit životnost baterie.

Tím, že baterie se drží při nižších teplotách, tak se v nich elektrochemické reakce probíhají pomaleji a proces vybití se také zpomalí [28].

Z čeho se skládá lithium-iontová baterie

Separátor

Separátor je nevodíč, který má za úkol oddělit kladnou a zápornou elektrodu. Nejčastěji bývá vyroben z nylonu, který je buď tkaný nebo plstěný. Aby byla zajištěna co největší propustnost iontů, tak musí být tento separátor co nejvíce porézní. Dalším požadavkem na separátor je, aby byl chemicky odolný proti nečistotám a také elektrickým procesům [27;29].

Kladná elektroda

Další součást baterie je kladná elektroda, která je z interakčních látek. Tyto látky jsou krystalické materiály, které slouží jako zdroj lithia [27].

Dále jsou popsány materiály, které se používají pro výrobu kladné elektrody [27].

Materiál – Oxid-kobaltnatý lithný - LiCoO_2

Jedná se o materiál, který se nejvíce používá v li-ion bateriích. Hlavně proto, že mají vysoké napětí a disponují dlouhou životností. Materiál má vrstevnatou strukturu. Bohužel tyto baterie disponují měrnou teoretickou kapacitou 130 mAh/g. V současné době se tento materiál přestává využívat, kvůli toxicitě kobaltu a jeho ceně [27].

Materiál – Oxid Lithium-nikelnatý - LiNiO_2

Další katodový materiál, který je tu zmíněn je LiNiO_2 a považuje se za náhradu materiálu LiCoO_2 . Baterie s tímto materiálem se vyznačují vyšší kapacitou a to 200 mAh/g. Bohužel tento materiál stejně jako LiCoO_2 jsou tvořeny pevným roztokem. Tyto materiály mají větší tepelnou nestabilitu a objevují se u nich exotermické reakce právě při nižších teplotách [27].

Materiál - LiNiCoO_2

Tento materiál vznikl jako náhrada za LiCoO_2 . Je to kombinace vlastností materiálu LiCoO_2 a LiNiO_2 . Kapacita baterií se teoreticky pohybuje v rozmezí od 190 až do 220 mAh/g. Tato hodnota je dána právě velikostí zastoupení Co v materiálu [27].

Materiál – Lithium-železo-fosfát - LiFePO_4

Materiál LiFePO_4 byl objeven koncem 20. století. Jeho struktura je olivová a díky této struktuře má dobrou až výbornou stabilitu během vyššího zatížení. Výhodou tohoto materiálu je to, že není hořlavý. Díky svému složení není tak nešetrný k životnímu prostředí [27].

Materiál – Oxid lithium-manganičitý - LiMn_2O_4

Tento materiál se považuje za náhradu za materiál LiFePO_4 , ale bohužel tento materiál má menší kapacity. Spinelová struktura dovoluje tomuto materiálu vysokou tepelnou odolnost při cyklování [27].

Materiál – Oxid lithium-nikl-manganičitý - $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$

Toto chemické složení materiálu dovoluje baterii nabíjet do 5 V. Tento materiál má spinovou strukturu, která je odolná proti cyklování. Energetická hodnota je vyšší než u materiálu LiCoO_2 a LiFePO_4 . Tato hodnota se přibližuje k hodnotě 700 Wh/kg [27].

Záporná elektroda

Záporná elektroda, která byla kdy vyrobena pro li-ion baterie, tak byla z kovového lithia. Ale tyto anody měly bezpečnostní problémy, tak se začaly hledat materiály, které by interagovaly s lithiovými ionty. Levný materiál, který tyto požadavky splňoval, tak byl uhlík, přesněji grafit. V následující tabulce je přehled materiálů pro anody li-ion baterie. Ze všech materiálů uvedených v tabulce 2.1, tak je nejvíce zajímavý křemík. To hlavně kvůli svým galvanickým vlastnostem, ceně a hlavně stálosti [27;29].

Tabulka 2.1 Porovnání anodových materiálů v li-ion bateriích [27].

Materiál	Li	C (Grafit)
Hustota [gcm^{-3}]	0,53	2,25
Teoretická maximální kapacita [mAhg^{-1}]	3862	372
Změna objemu [%]	100	12
Potenciál [V]	0	0,05
Lithiovaná anoda	Li	LiC_6

Elektrolyt

Elektrolyt je nedílnou součástí li-ion baterie a je to soustava minimálně dvou látek. Jedná se o kyseliny, soli, roztoky a taveniny. Tyto látky se vyznačují tím, že dokáží vést elektrický proud. Vždycky v elektrolytu je jedna ze dvou látek ve větším množství než ta druhá. Látka, která je ve větším nadbytku se nazývá rozpouštědlem. V rozpouštědle probíhá proces, při kterém jsou rozloženy elektroneutrální molekuly na kladně a záporně nabitě ionty. Kladně nabitě ionty senazývají kationty a záporně nabitě ionty se nazývají anionty, které přenášejí proud pohybem iontů v elektrolytu dochází k přenosu hmoty a k chemickým změnám. Disociace je jev, při kterém dochází v elektrolytu k rozkladu látek na ionty. Elektrolytická

disociace je chemický děj, při kterém dochází ke štěpení chemických vazeb molekul nebo krystalů rozpouštěné látky. Naopak jsou štěpeny molekuly elektrolytu a vzniká roztok, ve kterém se objevují volně pohybující se ionty [27;30].

Jsou 3 skupiny elektrolytů, a to podle stupně disociace. První skupinou jsou silné elektrolyty, středně silné elektrolyty a slabé elektrolyty [27;30].

Další dělení elektrolytů je na vodné a bezvodé neboli aprotické. U vodných elektrolytů je základem voda smíchaná s kyselinou nebo s hydroxidem. Aprotické elektrolyty jsou elektrolyty, které jsou bezvodé. Jsou to organická rozpouštědla a soli. Velkou výhodou aprotického elektrolytu je dobrá vodivost, velké potenciální okno, dobrá smáčivost elektrod a velký rozsah teplot [27;30].

Typy elektrolytů

Mezi základní typy elektrolytů patří pevné, kapalné a gelové. Do kapalných patří ještě bezvodé tekuté elektrolyty.

Pevné

Pevné elektrolyty jsou tvořeny iontovými krystaly. V těchto elektrolytech se přenáší ionty díky poruchám v krystalové mřížce. Rozlišují se dva typy poruch, a to Schottkyho a Frenkelovy poruchy [27;30].

Frenkelova porucha je definována jako částice v mimo mřížkovém prostoru neboli částice v interstacionální poloze. Oproti tomu Schottkyho porucha neboli vakance je definována jako absence částice v krystalové mřížce [27;30].

Mezi pevné elektrolyty se řadí i některé polymery, které dokáží vést ionty. Princip jejich vodivosti je podobný jako pohyb iontů v roztocích elektrolytů [27;30].

Kapalné

Kapalné elektrolyty jsou elektrolyty, které se nejčastěji skládají z litné soli a organického rozpouštědla. Jsou dva typy kapalných elektrolytů a to silné a slabé elektrolyty. Silné elektrolyty znamenají, že materiál se úplně rozloží na ionty tedy je kompletně disociován [27;30].

U slabých kapalných elektrolytů neproběhla kompletně disociace a to znamená, že elektrolyt obsahuje ionty a také nedisociované molekuly. Základní rozdělení kapalných elektrolytů je na vodné, bezvodé a roztavené soli. Vodné elektrolyty se vyznačují tím, že jsou to klasické elektrolyty, jako je kyselina sírová, hydroxid draselný anebo roztok hydroxidu sodného. Bezvodé roztoky jsou to hlavně roztoky, které jsou tvořeny směsí organických rozpouštědel. V těchto elektrolytech je disociována vhodná

sůl. Tyto bezvodé elektrolyty se využívají v aplikacích, kde by vlivem vody docházelo k degradaci nebo k prudké reakci. Tudíž se používají v lithiových bateriích a v superkondenzátorech. Mezi bezvodé elektrolyty se řadí rozpouštědla, která jsou běžná a je to například propylen karbonát, dimethyl karbonát, dimethyl formamid a další. V těchto rozpouštědlech se rozpouští elektrická sůl jako je například LiClO_4 nebo LiPF_6 [27;30].

Do kapalných elektrolytů patří ještě roztavené soli a mezi ně patří fluoridy, chloridy, jodidy. Ale jsou zde také oxidy Li, Na, K, Rb, Cs. Roztavené soli jsou vlastně nejkonzentrovější elektrolytické kapaliny ze všech [27;30].

Bezvodé

Bezvodé elektrolyty jsou elektrolyty, které neobsahují vodu, která reaguje s lithiem. Tyto elektrolyty se běžně vyskytují v li-ion bateriích. Používají se zde rozpouštědla soli lithia a směsi alkyl uhličitánů. Ze směsi alkyl uhličitánů například propyl karbonát. U bezvodých elektrolytů se jejich vodivost dá ještě vylepšit přidáním například ligandů. Ligandy korigují anionty, aby nedocházelo k párování a nesnížila se tímto [27;30].

Gelové

Gelové elektrolyty díky své povaze jsou vhodné pro li-ion baterie, ale bohužel mají špatné mechanické vlastnosti. Dalším problémem je, že v těchto typech elektrolytů vznikají dendridy a to vede až ke zničení baterie [27;30].

Gelové elektrolyty mají tu výhodu, že kombinují vlastnosti kapalných elektrolytů a pevných elektrolytů a tím se dosáhne velké vodivosti iontů při pokojové teplotě. Díky tomu, že mají špatné mechanické vlastnosti, tak může dojít třeba k změkčení polymeru po zavedení tekutého polymeru do polymerní matice. Tento problém, ale lze vyřešit tím, že se použije netkaná textilie nebo polyethylen [27;30].

Lithné soli

Lithná sůl se skládá ze solí alkalických kovů, a tak je nejméně rozpustná ve vodě, a proto se lithné soli rozpouští v jiných polárních rozpouštědlech, než je voda, a to například v ethanolu nebo v kapalném amoniaku [27].

Zde je popis základních lithných solí, které se v dnešní době používají v li-ion bateriích [27].

Chloristan lithný - LiClO₄

Nejčastější představitel lithných solí je Chloristan lithný. Tato sůl je bezbarvá nebo má bílou barvu. Nejčastěji se používá z toho důvodu, že se nejsnadněji rozpouští v rozpouštědlech a má dobrou vodivost. Jako každá látka má nevýhodu, že je to silný oxidant a reaguje s velkou většinou organických látek [27].

Tabulka 2.2 Vlastnosti LiClO₄ [27].

Molární hmotnost	106,392 g/mol
Hustota	2,42 g/cm ³
Bod tání	236 °C
Bod varu	430 °C
Rozpustnost ve vodě	60 g/100ml

Lithium tetrafluoroborát - LiBF₄

Lithium tetrafluoroborát je krystalická látka bez zápachu. Tato látka má šedou barvu. Bohužel se musí s ní pracovat opatrně, protože při styku s kůží způsobuje popáleniny. Tato látka má nevýhodu v tom, že má nízkou vodivost [27].

Tabulka 2.3 Vlastnosti LiBF₄ [27].

Molární hmotnost	93,745 g/mol
Hustota	0,852 g/cm ³
Bod tání	296,5 °C

Lithium hexafluorofosfát - LiPF₆

LiPF₆ jinak Lithium hexafluorofosfát se nejčastěji používá jako elektrolyt. Využívá se hlavně z toho důvodu, že splňuje všechny požadavky. Nevýhodu má v problému s přípravou a čištěním. LiPF₆ je citlivý na okolní prostředí (vlhkost), rozpouštědla a vysoké teploty [27].

Tabulka 2.4 Vlastnosti LiPF₆ [27].

Molární hmotnost	151,905 g/mol
Hustota	1,5 g/cm ³
Bod tání	200 °C

Chloristan sodný - NaClO₄

NaClO₄ neboli Chloristan sodný je anorganická sloučenina. Je z chloristanových solí a má bílou barvu a je krystalická. Nejlépe se rozpouští ve vodě nebo v alkoholu. Chloristan se vyrábí anodickou oxidací chlorečnanu sodného na platinové elektrodě [27].

Tabulka 2.5 Vlastnosti NaClO₄ [27].

Molární hmotnost	122,44 g/mol
Hustota	2,5 g/cm ³
Bod tání	468 °C
Bod varu	482 °C
Rozpustnost ve vodě	209,6 g/100ml

Rozpouštědla lithných solí

Nedílnou součástí li-ion baterií jsou rozpouštědla. Ve většině případů se používají organická rozpouštědla. V bateriích li-ion se používají následující rozpouštědla [27;30].

Sulfolan

Sulfolan je kapalina, která má bod tání 27,5 °C. Do této teploty je v pevném stavu. Sulfolan se nejvíce využívá v chemickém průmyslu. Je to kapalina, která je bezbarvá, tudíž je čirá a základní její vlastností je to, že se vyznačuje stabilitou při opětovném využití, a hlavně se dá snadno odstranit [27].

Tabulka 2.6 Vlastnosti sulfolanu [27].

Chemické složení	C ₄ H ₈ O ₂ S
Molární hmotnost	120,17 g/mol
Bod tání	27,5 °C
Bod varu	285 °C
Bod vzplanutí	165 °C
Hustota	1261 kg/m ³
Viskozita (30 °C)	10,07 mPa.s
Teplota samovznícení	528 °C
Dipólový moment	4,35 D
Relativní permitivita	44

Propylen karbonát

Rozpouštědlo, které je bezbarvé, a hlavně je bez zápachu. Je vedlejším produktem při syntéze polopropylenem karbonátu a karbon dioxidem. Toto rozpouštědlo má jednu z největších nevýhod a to, že rozkládá uhlík, a proto se v bateriích nevyužívá a používá se jako změkčovadlo při výrobě polymerů [27].

Tabulka 2.7 Vlastnosti propylen karbonátu [27].

Chemické složení	C ₄ H ₆ O ₃
Molární hmotnost	102,09 g/mol
Bod tání	-55 °C
Bod varu	241,7 °C
Bod vzplanutí	122 °C
Hustota	1190 kg/m ³
Viskozita (30 °C)	2,5 mPa.s
Teplota samovznícení	455 °C
Dipólový moment	4,92 D
Relativní permitivita	65

Ethylen karbonát

Je rozpouštědlo, které má nevýhodu v tom, že má vysoký bod tuhnutí. Proto se používá v iontových bateriích. Jedná se bezbarvé rozpouštědlo, které je bez zápachu. Hlavní výhodou je, že má nízkou toxicitu a je biologicky odbouratelné [27].

Tabulka 2.8 Vlastnosti ethylen karbonátu [27].

Chemické složení	C ₃ H ₄ O ₃
Molární hmotnost	88,06 g/mol
Bod tání	36,3 °C
Bod varu	248,2 °C
Bod vzplanutí	152 °C
Hustota	1321 kg/m ³
Viskozita (30 °C)	1,5 mPa.s
Teplota samovznícení	465 °C
Dipólový moment	5,35 D
Relativní permitivita	89,78

Dimethyl sulfoxid

Toto rozpouštědlo se řadí mezi polární rozpouštědla. Jedná se o bezbarvou látku, která je bez zápachu. Toto rozpouštědlo se mísí s vodou a organickými rozpouštědly. Je mírně kyselé. Jeho použití je převážně v lékařství a farmaceutickém průmyslu [27].

Tabulka 2.9 Vlastnosti dimethyl sulfoxidu [27].

Chemické složení	C ₂ H ₆ OS
Molární hmotnost	78,13 g/mol
Bod tání	18,5 °C
Bod varu	189 °C
Bod vzplanutí	89 °C
Hustota	1100 kg/m ³
Viskozita (30 °C)	1,99 mPa.s
Teplota samovznícení	215 °C
Dipólový moment	4,1 D
Relativní permitivita	48

Dimethyl karbonát

Jedná se rozpouštědlo, které se vypařuje za pokojových teplot. Je to sloučenina, která je těkavá a je založena na uhlíku. Dimethyl karbonát se využívá v li-ion bateriích převážně jako lithiová anoda v organickém rozpouštědle [27].

Tabulka 2.10 Vlastnosti dimethyl karbonátu [27].

Chemické složení	C ₃ H ₆ O ₃
Molární hmotnost	90,08 g/mol
Bod tání	2,0 – 4,0 °C
Bod varu	153 °C
Bod vzplanutí	17 °C
Hustota	1170 kg/m ³
Viskozita (30 °C)	0,584 mPa.s
Teplota samovznícení	458 °C
Dipólový moment	0,81 D
Relativní permitivita	3,17

Obal lithium-iont baterií

První typ provedení baterií se objevil už v roce 1896 a od tohoto roku se provedení baterií vyvíjelo až byly první typy provedení normalizovány. Je velké množství provedení těchto baterií. Nejznámější provedení je válcového tvaru a také v neposlední řadě hranolového tvaru. U baterií, které jsou válcového tvaru se výrobci těchto baterií shodli na jejich rozměrech. Na rozdíl od válcových baterií, tak u hranolových je situace odlišná. U prizmatických bohužel nejde přesně určit o jaký tvar se jedná a který je nejpoužívanější [31;32].

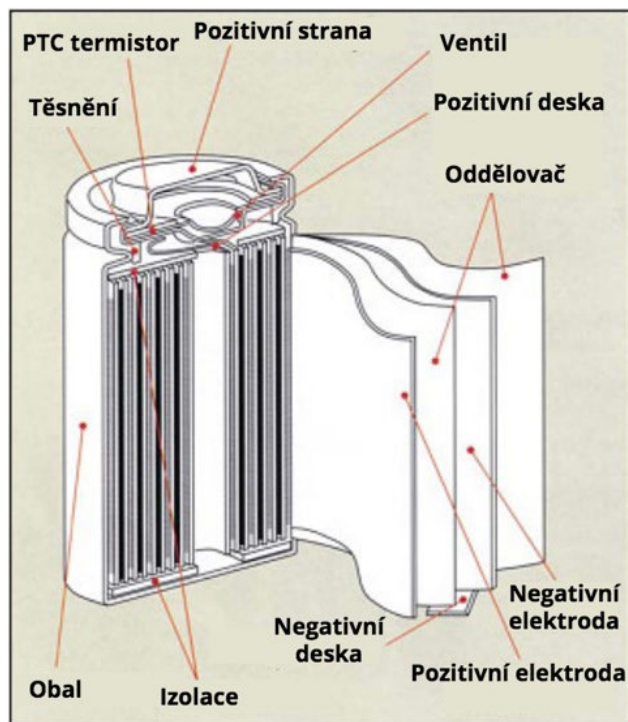
Nejznámější provedení baterií je takzvané válcové provedení neboli cylindrické provedení. Používá se pro primární baterie i pro sekundární baterie. Jeho hlavní výhodou je dobrá mechanická stabilita a jednoduchá výroba. Některé typy mohou mít u kladného pólu

bezpečnostní prvek. Tento prvek je membránové těsnění, které se pod vysokým tlakem protrhne. Po protržení této membrány může docházet k vysychání baterie nebo prosakování. Dalším bezpečnostním prvkem je takzvaný tepelný spínač, který s kladným tepelným koeficientem (PTC) zapříčiní, že polymer, který je normálně vodivý, tak se stane nevodivým a zastaví procházející proud. Tato funkce je ochrana proti zkratu baterie. Jakmile se baterie ochladí a zkrat se odstraní, tak se PTC stane znovu vodivým. Jako další bezpečnostní prvek je takzvaný CID, což je speciální forma omezovače. Tento omezovač se nachází u pozitivního terminálu baterie. K přerušení cesty proudu dojde při překročení určitého tlaku uvnitř baterie. Toto se může stát při přebíjení baterií. Pokud CID zafunguje, baterie se fyzicky a nenávratně odpojí [31;32].

Válcový obal

Válcové baterie mají obrovské využití jak v elektrickém nářadí, lékařství, počítačích, elektrokolech, tak i v dalších aplikacích. Aby baterie byly stejné musely se standardizovat a vznikla různá označení. Nejznámější baterie nese označení 18650. Baterie s tímto označením 18650 má rozměry 18 mm v průměru a 65 mm na výšku. Větší baterie nese označení 26650 a má stejnou výšku jak 18650, ale má jiný průměr a to 26 mm. V roce 2013 bylo vyrobeno celkem 2,55 miliard baterií 18650. První baterie tohoto typu měly energetickou kapacitu 2,2 Ah a tato kapacita se jen zvětšuje. V roce 2017 dosahovaly energetickou kapacitou 3,4 Ah. I tato energetická kapacita se nadále bude jen zvětšovat a připravují se baterie s energetickou kapacitou 3,9 Ah a více. A to všechno v pouzdře s označením 18650. Větší baterie budou mít větší energetické kapacity [31;32;33;34].

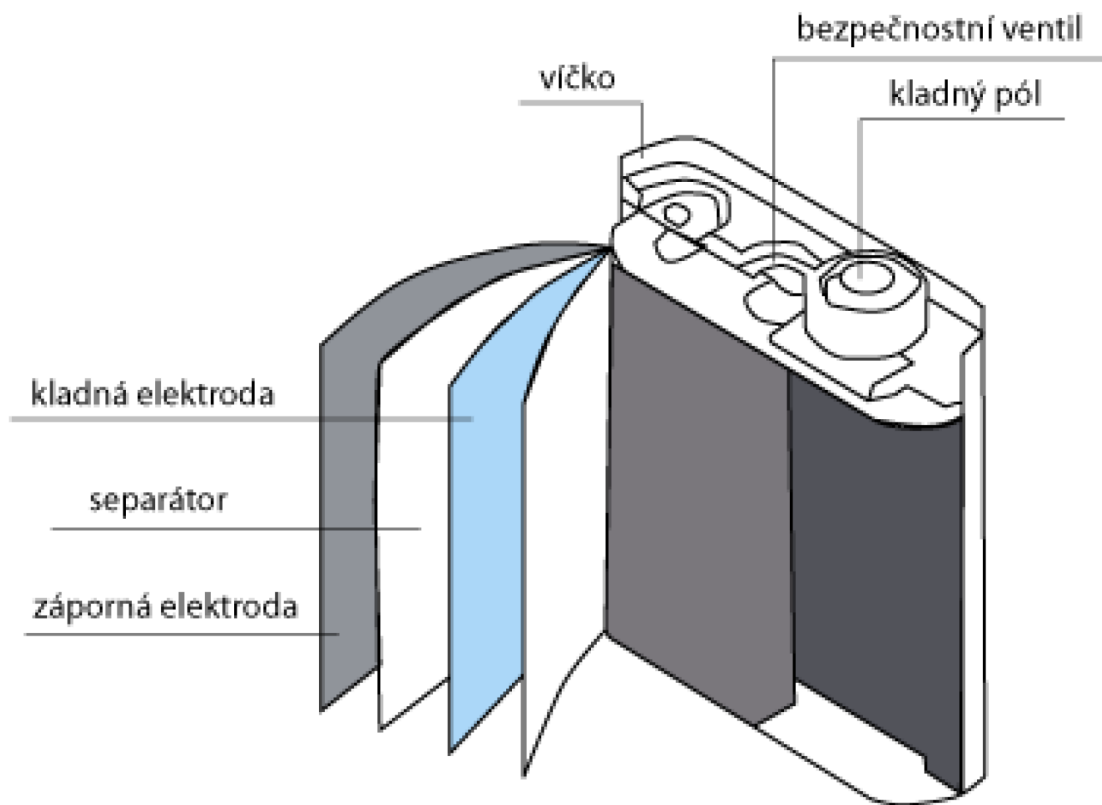
Na závěr k válcovému provedení je nutné dodat, že společnost Tesla přestavila baterii s kódovým označením 4680, který má být ze všech baterií nejlepší a má mít největší kapacitu. Složení baterie je vidět na Obrázek 2.2 [31;32;33;34].



Obrázek 2.2 Struktura válcové baterie [33].

Prizmatický obal

Dalším typem provedení je prizmatická baterie, která byla představena v 90. letech a byla vyvinuta z toho důvodu, že se zmenšovaly zařízení a byla potřeba zmenšit baterie, tak aby se daly použít do moderních zařízení. Tyto baterie připomínají svým vzhledem krabičku od žvýkačky nebo čokoládovou tyčinku. Tyto baterie se vyrábějí jak v malých velikostech, tak je lze najít i ve větších provedeních. Mají obrovské možnosti využití a v dnešní době jejich rozměry nejsou standardizovány, takže lze využít v různých zařízeních, jako jsou mobilní telefony, tablety a další zařízení. V dnešní době, kdy se čím dál častěji objevují elektromobily, tak tyto typy baterie lze použít taky v bateriových modulech elektromobilů. Na začátku vývoje tyto baterie dosahovaly malých kapacit a to od 800 mAh do 4 000 mAh, ale v dnešní době se tyto baterie objevují v kapacitách od 20 do 50 Ah. Jelikož zde ještě nebyly zmíněny obaly těchto baterií, tak je dobré zmínit, že provedení obalu je hliník, který se nejčastěji svařuje pomocí laseru. Strukturu prizmatické baterie je vidět na obrázku 2.3 [34;35].



Obrázek 2.3 Struktura prizmatické baterie [36].

Knoflíkový obal

Knoflíkové provedení baterie se objevilo v 80. letech a bylo hlavně rozšířeno v přenosných zařízeních. Jelikož tato baterie měla malé napětí, tak pro vyšší napětí bylo nutné tyto baterie stohovat do takzvané trubice. Největší použití měly v bezdrátových telefonech, lékařských přístrojích a atd [34].

Toto provedení baterií mělo tu výhodu, že bylo malé a levné na výrobu, ale upadl v nemilost, protože se na trhu objevily běžnější formáty baterií. Mezi hlavní nevýhody knoflíkového provedení je bobtnání baterie při nabíjení vysokým proudem. Další nevýhodou je, že tyto baterie nemají bezpečnostní ventilaci [34].

Vakový obal

Posledním typem provedení baterií je takzvané sáčkové provedení, které bylo uvedeno v roce 1995 a překvapilo svět svým designem. Jako hlavní výhodou oproti jiným provedením je, že byl odstraněn kovový obal a baterie se stal lehčí. Také je tu jejich účinnost, která se pohybuje okolo 90 až 95 procent využití prostoru v balení. Protože tyto baterie nemají kovový obal lze vyrobit baterie různých velikostí a tvarů a tím se dají využít v různých aplikacích, jako jsou mobilní telefony, tablety, lékařské aplikace, vojenské účely a atd.

Větší baterie tohoto typu mohou dosahovat až kapacity 80 Ah. Je dobré také zmínit jejich hlavní nevýhodu a tou, že u těchto baterií může docházet k delaminaci a k nafukování baterie. Jak vypadá nafouknutá baterie je vidět na Obrázek 2.4 [34].



Obrázek 2.4 Nafouknutý vakový obal [34].

Metody stárnutí lithium-iont baterií za snížené teploty

Zde je popsán proces stárnutí z pohledu nízkých a normálních teplot. Je zde popsána tvorba pasivační vrstvy, impedanční vrstvy a pokovování anody s tvorbou dendridů.

Nízké teploty obecně mají vliv na životnost baterií. Pokud se baterie vybíjí za snížených teplot pod 0 °C, tak to ovlivňuje vlastnosti baterií. Snížené teploty způsobují, že baterie, která má kapacitu 2,2 Ah, může mít při vybíjení proudem 1C za nízkých teplot pod bodem mrazu kapacitu 1,7 Ah [37].

Nízké teploty také způsobují, že baterie má zvýšený vnitřní odpor a toto také ovlivňuje dodávaný výkon baterie [37].

Kdyby se baterie nabíjela za nízkých teplot, se může spustit proces pokovování anody. Toto pokovení anody také vede k výraznému úbytku kapacity baterie [37].

Pokud se baterie nabíjí při nízkých teplotách pod bodem mrazu tak při nabíjení může se stát to, že se nenávratně ztratí část kapacity. Například, kdyby se baterie nabíjela proudem 1C při teplotě 0 °C, tak jeden nabíjecí cyklus by mohl způsobit, že by baterie přišla přibližně o 3,6 % své kapacity [37].

Proto se nabíjení při teplotách pohybujících blízko 0 °C, nebo pod ní nedoporučuje. Pokud je potřeba nabíjet baterii při nízkých teplotách, by bylo vhodné ji nabíjet malými proudy po dlouhou dobu, aby se zabránilo pokovování anody [37].

Degradační vlivy za nízké teploty

Ve vědeckých člancích, které se zabývají vlivem nízkých teplot, tak se objevuje převážně růst pasivační vrstvy, růst dendridů, pokovování anody, impedance anody a vliv nízké teploty na elektrolyt [38].

Další procesy, které nastávají při nízkých teplotách jsou změny v materiálech. Při nízkých teplotách elektrolyt začíná tuhnout. Když tento elektrolyt začne tuhnout, tak začíná mít zhoršené vlastnosti v podobě toho, že špatně vede ionty lithia. [38].

Proto, aby elektrolyt nezačínal tuhnout při nízkých teplotách, tak se do elektrolytu přidávají další chemické složky, které posunují bod tuhnutí [38].

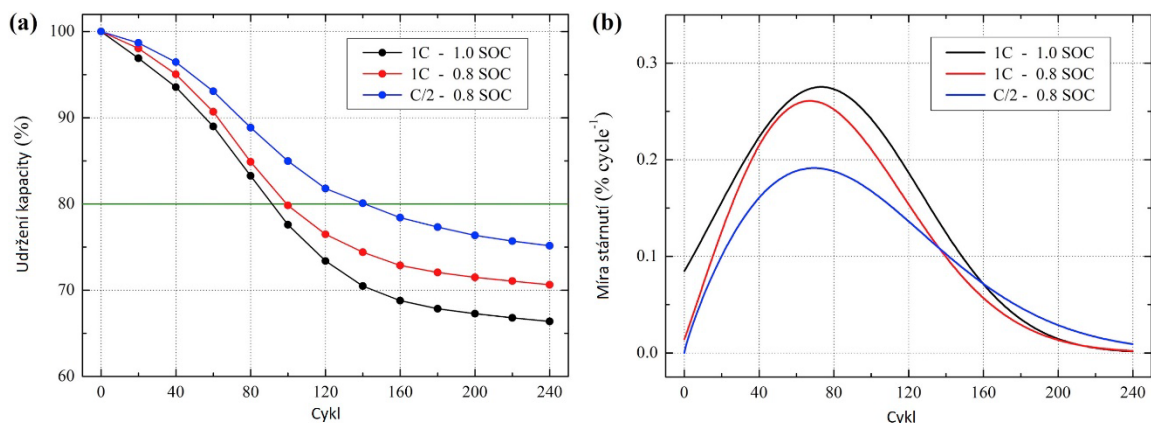
Během nabíjení baterie za nízkých teplot může docházet k poškození vrstvy SEI, a jakmile se tato vrstva poškodí, tak se začne znovu tvořit a baterie tímto procesem ztratí část své kapacity [38].

Co to je vrstva SEI a jak se tvoří je popsáno v Pasivační vrstva SEI. Dendridy a Pokovování anody je popsáno v Pokovování anody [39].

Velký vliv na kapacitu baterie má teplota, ve které se baterie nachází. Se snižující se teplotou se elektrolyt uvnitř baterie přechází z kapalné podoby do pevné formy. V této pevné formě bohužel nedokáže elektrolyt vést nabité ionty lithia. Po ohřátí baterie může dojít ke kompletnímu zničení baterie. K tomuto zničení může dojít vlivem stavu nabití. Pokud baterie je ve vybitém stavu, tak může dojít k pokovení anody, která zabrání průchodu iontů na aktivní vrstvu. Pokovení anody způsobuje, že baterii roste vnitřní odpor. Na kovovém lithiu mohou začít růst dendridy, které mohou zapříčinit zkrat baterie [39].

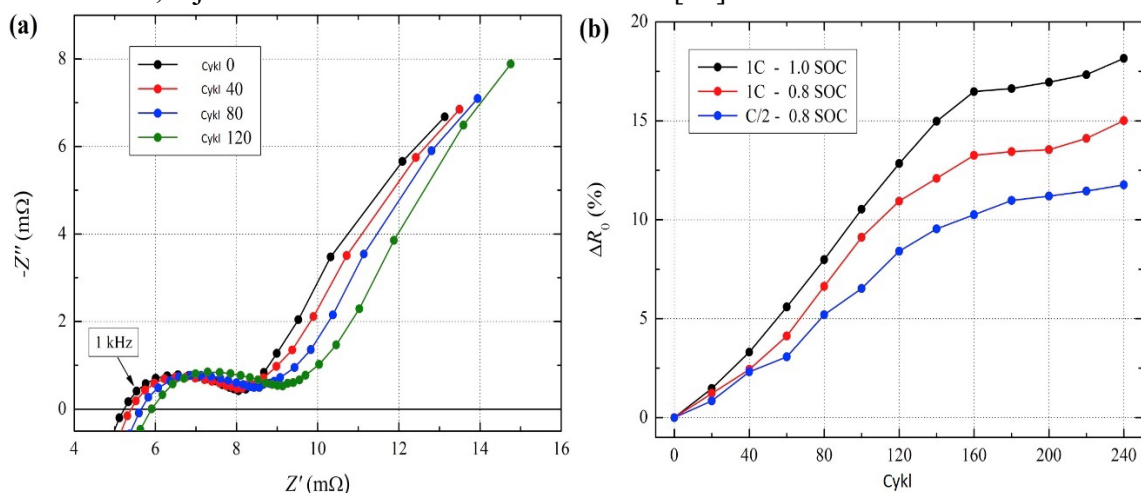
Nabíjení baterií za nízkých teplot vysokým proudem vede k omezení přenosu iontů na SEI rozhraní. K pokovování lithiem dochází, když je grafitový potenciál snížen pod 0V proti Li/Li⁺. Pokud lithium-iontová difuze v grafitu je pomalá, tak se povrch nasytí ionty lithia a toto vede k pokovení lithiem. Se snižující se teplotou, se urychluje pokovování. Pokovení lithiem je jednou z nejrychlejších degradačních technik za nízkých teplot [39].

Degradační vlivy za normální a zvýšené teploty jsou dobře popsány oproti degradačním vlivům za nízkých teplot [39].



Obrázek 2.5 Křivka zachování kapacity a míry stárnutí [39].

Na obrázku 2.5 je v části (a) vyobrazeny křivky udržení kapacity při nabíjení různými proudy a v různých stavech nabití. V části (b) je zaznamenána míra stárnutí. Podle tohoto obrázku jde vidět, že nízké teploty jsou pro baterie nebezpečné. Pokles kapacity je spjatý s množstvím cyklů a také s vybíjecími proudy. Když se baterie vybíjí při vyšších proudcích, je pokles kapacit razantnější, než při vybíjení menšími proudy. Také záleží, v jakém stavu nabití se baterie nachází [39].



Obrázek 2.6 Záznam impedance a procentuálního nárůstu odporu [39].

Obrázek 2.6 je rozdělen na dvě části v první části (a) jsou znázorněny impedanční spektra během cyklování za nízkých teplot. Nabíjení a vybíjení bylo prováděno s 1C/1,0 SOC. Je zde patrný posun spektra s nárůstem cyklů. V druhé části (b) obrázku je zaznamenán růst odporu R_0 pro různé nabíjecí proudy a stavy nabití. Při vyšších proudcích je nárůst odporu s počtem cyklů rychlejší, ale záleží na počátečním stavu nabití (SOC) [39].

Změny v materiálech

Pokud se baterie nachází v nízkých teplotách, tak tyto nízké teploty ovlivňují materiálové změny. Tyto změny v materiálu se objevují v makroměřítku a ovlivňují rychlost nabíjení, rychlost vybíjení baterie a kapacitu baterie [37].

Základními třemi faktory, které ovlivňují baterii při nízkých teplotách jsou: mezifázové jevy na anodě, viskozita elektrolytu a pomalá difuze v lithiu, které je v pevném stavu [37].

Při nízkých teplotách difuze iontů z pevného lithia prudce klesá. Tento jev je více patrný při nabíjení, tedy při procesu lithiace. Méně patrný je při procesu vybíjení tedy při delithiaci [37].

Při nízkých teplotách může mít baterie až o 300% vyšší odpor, než při pokojové teplotě a za vybitého stavu. Za vnitřní omezení se nejen považuje zvýšený vnitřní odpor, ale také pomalá difuze [37].

Všechny jevy, které jsou popsány v této části, způsobují špatnou vodivost na katodě, ale také k pomalému transportu lithia [37].

Elektrolyt při nízkých teplotách začíná tuhnout a je viskózní. Toto způsobuje, že baterie má špatný výkon. Pokud se elektrolyt stane viskózním, tak se v něm začínají špatně pohybovat ionty lithia a může zde nastat i jev, při kterém se budou ionty ztrácet [37].

Proces stárnutí

Proces stárnutí je nežádoucí jev, který se objevuje u všech elektrochemických baterií. Tento proces stárnutí znamená, že v baterii probíhají neustále chemické reakce, které bohužel nejde zastavit, ale jde je zpomalit tím, že baterii, který se nevyužívá, bude se skladovat při nízkých teplotách, kdy je tento proces zpomalen, ale není zastaven [29;40;41].

Impedance anody

Impedance anody se zvyšuje tím, že se vytvoří pasivační vrstva na anodě. Nejen se zvyšuje impedance anody, ale také se zvyšuje přenosový odpor. Co všechno ovlivňuje impedanci anody je počet cyklů, teplota, rychlost nabíjení. Další ovlivňující faktor je velikost částic anody. [29;42;43;44].

Pokovování anody

Dendridy vznikají během chemických procesů na elektrodě a mají formu tenkého vlákna. Tyto dendridy zhoršují vlastnosti baterií. Pokud dendridy prorostou mezi elektrodami zničí celou baterii. Dendridy mohou vyvolat zkrat nebo požár [29;45;46;47].

Pokovování anody znamená, že pokud baterie je ochlazená nebo studená, může dojít k pokovování anody. Znamená to, že anoda je obalena ionty. Tyto ionty nedokáží projít přes anodu nebo nemají dostatek energie k proniknutí do aktivní hmoty. Tímto právě dochází k pokovování anody [29;45;46;47].

Změny ve struktuře

U strukturálních změn může dojít k poruchám uspořádání částic anody. K této poruše může docházet během životnosti baterie. Strukturální porucha není hlavním zdrojem stárnutí baterie. Zdrojem stárnutí také není velikost částic nebo mřížkový parametr. Mechanické napětí na grafitové mřížce je způsobeno cyklováním li-ion baterií velkým proudem a na velkou míru nabití. Bohužel toto mechanické namáhání způsobuje praskliny, trhliny a může oddělovat grafénovou vrstvu. Toto způsobuje snížení uspořádání a orientaci původní struktury [29].

Cyklovatelnost lithiových iontů

U baterií typu li-ion může dojít ke ztrátě cyklovatelnosti lithiových iontů. K této ztrátě přispívají dva faktory. Prvním faktorem je SEI vrstva a druhým faktorem je reakce iontů s elektrolytem v pozdější fázi životnosti baterie. Vrstva SEI brání iontům v průchodu a tyto ionty tunelují přes tuto vrstvu. Tato ztráta se objevuje hlavně u baterií, které jsou plně nabitě a skladují se. Pokud se baterie skladují v nabitém stavu více jak 3,6 V, tak může nastat podobný degradační jev i u katody. Zde může dojít k oxidaci katody. Zde oxiduje elektrolyt na katodě vytváří povrchové reakce. Tyto reakce vytváří vrstvu na aktivním povrchu katody. Bohužel tato vrstva je izolační tím způsobuje nehomogenitu toku elektrického proudu [29].

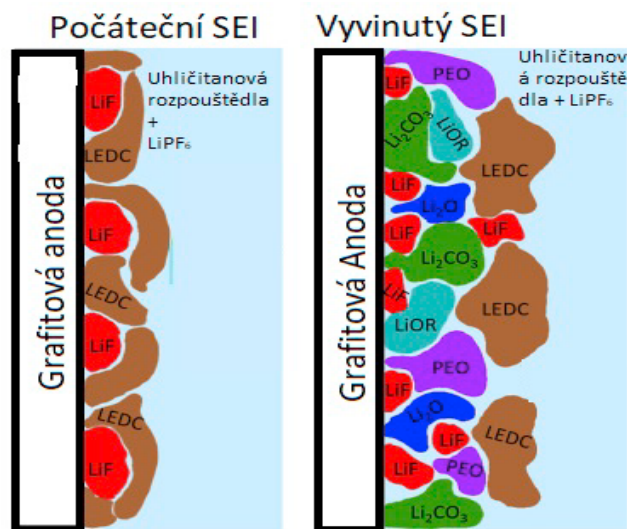
Pasivační vrstva SEI

Pasivační vrstva neboli SEI znamená, že se vytvoří na anodě pevná vrstva, která je označována jako SEI. Je to podstatě rozhraní mezi anodou a elektrolytem [29;38;40;41;48].

Vrstva SEI vzniká během prvního nabíjecího cyklu li-ion baterie. Dochází zde k rozkladu elektrolytu na povrch anody. Pasivační vrstva je složena z organických a anorganických složek rozkládajícího se elektrolytu. Tato první vrstva se může vytvářet několik cyklů. Rychlost vytvoření vrstvy je závislá na několika faktorech. Mezi tyto faktory patří složení elektrolytu a množství přísad v elektrolytu.

Velikost vrstvy se pohybuje od stovek pikometrů až po desítky nanometrů. Bohužel velikost této vrstvy nejde změřit, a to z toho důvodu, že některé složky se rozpouští v elektrolytu. Pasivační vrstva dovoluje iontům, aby prošly, ale elektrony nemohou přes tuto vrstvu [29;38;40;41;48].

Pasivační vrstva tvoří důležitou úlohu v li-ion bateriích. Zabraňuje redukcii lithiových kationtů v elektrolytu. Pokud se vrstva SEI poškodí, tak začne znovu proces tvorby a tím se značně sníží kapacita baterie. Další úlohou vrstvy SEI je zabránění dalšímu rozkladu elektrolytu na anodě. Vrstva SEI výrazně ovlivňuje vlastnosti baterie [29;38;40;41;48].



Obrázek 2.7 Složení vrstvy SEI [47].

Na Obrázek 2.5 je znázorněno, jak vypadá vrstva SEI v počáteční fázi a jak vypadá vyvinutá vrstva. Vrstva, která je blíž k anodě je vrstva anorganických sloučenin. Dál od anody blíže k elektrolytu je vrstva organických sloučenin. Toto složení ovlivňuje množství rozpouštědla v elektrolytu. Kromě rozpouštědel složení vrstvy také ovlivňují lithné soli [48].

Elektrochemické vlastnosti

Výrobci baterií ve svých dokumentech k bateriím udávají základní informace o bateriích. Mezi tyto základní informace vlastností patří maximální nabíjecí a vybíjecí proud, jmenovitá kapacita, nominální napětí, vnitřní odpor, provozní teploty, skladovací teploty, samovybíjení a životnost.

Maximální nabíjecí proud

Maximální nabíjecí proud je hodnota proudu, kterou lze baterii nabíjet. Tento proud se liší podle typu baterie a výrobce. U většiny baterií se udává maximální nabíjecí proud 1C,

ale některé typy baterií dokáží být nabíjeny větším proudem. 1C znamená, že se nabíjí proudem odpovídající jednonásobku kapacity baterie.

Optimální nabíjecí proud

Hodnota proudu, která je doporučena výrobcem baterie. V dokumentacích lze tuto hodnotu najít pod označením Standard charge.

Maximální vybíjecí proud

Maximální vybíjecí proud je hodnota proudu, kterým lze baterii vybit, aniž by se baterie zničila nebo poškodila. Ve většině případů se v dokumentacích udává hodnota v ampérech, ale někdy se dá najít hodnota uvedena v jednotkách C.

Optimální vybíjecí proud

Proud udávaný výrobcem baterie, který je doporučený pro maximální životnost baterie.

Jmenovitá kapacita

Jmenovitá, neboli zaručená kapacita baterie je určena za stanovených podmínek a je deklarována výrobcem baterie.

Nominální napětí

Nominální neboli jmenovité napětí baterie je přibližná hodnota napětí, která se používá k označení nebo identifikaci baterie. Výrobci li-ion baterií udávají hodnotu napětí 3,7 V, ale podle standardu EU by měli udávat hodnotu 3,6 V.

Vnitřní odpor

Vnitřní odpor neboli zdánlivý se vyjadřuje v ohmech (Ω). Tento termín v technické praxi je nahrazen termínem vnitřní impedance. Je závislá na stavu nabití baterie, stáří baterie a dalších parametřů. Když hodnota vnitřního odporu je vysoká, tak se baterie protékajícím proudem začne více zahřívat.

Provozní teploty

Provozní teploty jsou teploty, které jsou doporučeny výrobcem pro používání baterií. Tyto teploty se dělí dále na nabíjecí a vybíjecí teploty. U nabíjecích teplot se nedoporučuje nabíjet baterie pod 0 °C z toho důvodu, že může dojít k rychlému znehodnocení baterie. Pro nabíjení se ve většině případů udává rozsah teplot od 0 °C do 45 °C. Rozsah vybíjecích teplot je vyšší než nabíjecích teplot a to od -20 °C do 70 °C. Tento rozsah se může lišit podle složení a podle výrobce baterie.

Skladovací teploty

Teploty pro skladování se pohybují přibližně okolo 20 °C. Tato teplota se doporučuje výrobcem baterie, ale záleží také na době skladování. Tato teplota se může lišit podle toho, jak dlouho se baterie bude skladovat.

Samovybíjení

Samovybíjení je jev, při kterém baterie se pozvolna vybíjí bez připojení do obvodu.

Životnost

Životnost baterie záleží, jestli se jedná o primární nebo sekundární baterii. U primární baterie je životnost závislá na celkové době vybíjení nebo na kapacitě baterie. U sekundárních baterií se životnost udává v cyklech. Jeden cyklus znamená nabití a vybití baterie. Pokud je tato hodnota uvedena v dokumentaci, tak označuje maximální hodnotu, která byla dosažena v laboratorních podmínkách.

3. MĚŘICÍ PŘÍSTROJ

Celé měření se provádělo pomocí systému od společnosti BioLogic Science Instruments. Přesněji byl využíván systém BCS-8xx, který slouží k cyklování baterií. Pro měření baterií byl přesněji využit modul BCS-815, který má osm kanálů a na každém kanálu může být maximální proud 15 A. Tyto kanály se mohou sloučit do jednoho kanálu s maximálním proudem 120 A.

Systém BCS-8xx je spojen s počítačem, na který se zaznamenávají naměřená data. Program, který byl použit pro komunikaci se systémem BCS-8xx je BT-Lab, který byl spuštěn na platformě Windows ve verzi 1.71.



Obrázek 3.1 Měřicí systém BCS-815

Samotný postup měření baterií je následující. Na baterie byly přibodovány vývody k připojení sond. Tyto sondy jsou následně připojeny k měřicímu systému BCS-815. Ke každé baterii byl připevněn teplotní senzor, tak aby bylo možné měřit teplotu baterií.

Podobný princip zapojení je i u měření za snížené teploty. Je tu rozdíl v tom, že byla použita klimatická komora na měření za teplot pod 0 °C. Klimatická komora byla nastavena na teplotu -5 °C. Baterie byly vloženy do klimatické komory a ze zadní strany klimatické komory byly přivedeny kabely k samotnému měření.

Kromě klimatické komory byl využit i malý mrazicí box, do kterého byl vyvrtán otvor na protažení kabelů. Stejně jako u klimatické komory byla nastavena teplota na - 5 °C. Toto nastavení bylo provedeno na připojeném teplotním relé, které ovládalo spínání chladicího okruhu mrazicího boxu.

4. MĚŘENÍ BATERIÍ

Měřily se celkem 4 druhy baterií. První baterie, která se měřila je od společnosti Goowei, druhá baterie je od společnosti LG. Třetí baterie, která se měřila je od společnosti GWL a u poslední baterie není znám výrobce.

Baterie byly proměřovány za pokojové a za snížené teploty. Pokojová teplota se pohybovala od 20 °C do 25 °C. Sníženou teplotou se myslí teplota pod 0 °C, přesněji byla nastavena teplota -5 °C. Této nízké teploty bylo dosaženo pomocí klimatické komory a chladicího boxu.

Od každého typu byly dodány dvě sady, které se proměřovali za stejných podmínek a porovnávali se naměřené výsledky.

V následujícím textu jsou použity zmenšené grafy, které jsou ve zvětšené podobě v Příloha C -.

Měření za pokojové teploty

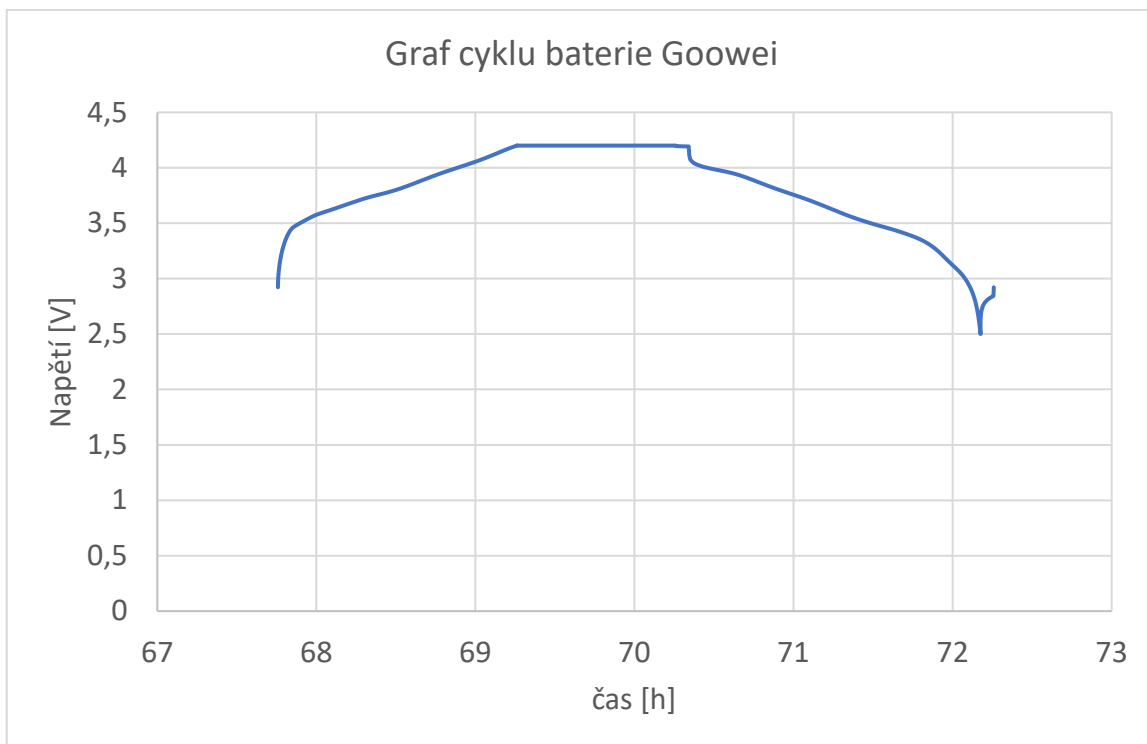
Goowei baterie

Baterie od společnosti Goowei mají definovanou kapacitu celkem 3200 mAh. Její maximální nabíjecí napětí je 4,2 V a maximální nabíjecí proud je 3100 mA. Maximální vybíjecí proud udává výrobce maximálně 10 A. Údaje, které udává výrobce, jsou vypsány v Tabulka 4.1.

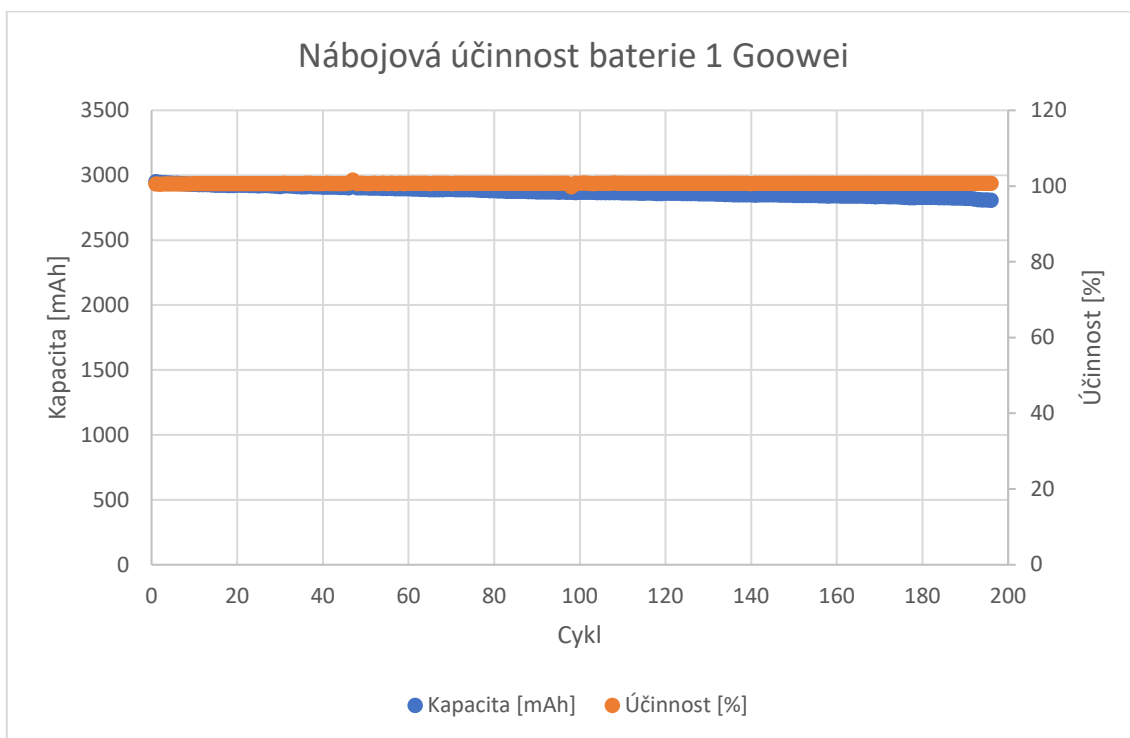
Tabulka 4.1 Údaje udávané k baterii Goowei

Údaje udané výrobcem		
Položka	Stav / Poznámka	Specifikace
Energie	Standartní nabíjení / vybíjení	Nominální [mAh] 3200
		Minimum [mAh] 3100
Minimální napětí	Průměr	3,67 [V]
Standartní nabíjení	Konstantní proud	0,5C (1550 mA)
	Konstantní napětí	4,2 [V]
	Koncový proud (přerušeni)	50 [mA]
Maximální nabíjecí napětí		4,2 ± 0,05 [V]
Maximální nabíjecí proud		1,0C (3100 mA)
Standartní vybíjení	Konstantní proud	0,2 C (620 mA)
	Koncové napětí (přerušeni)	2,5 [V]
Maximální vybíjecí proud		10 [A]

Při cyklování 200 cykly byl nastaven nabíjecí proud na 1,6 A a napětí na baterii 4,2 V. Vybíjecí proud byl nastaven na 1,6 A baterie se vybíjela na hodnotu 2,5 V. Průběh nabíjecího cyklu je vyobrazen na Graf 4.1 Byl zvolen cyklus s pořadovým číslem 15.

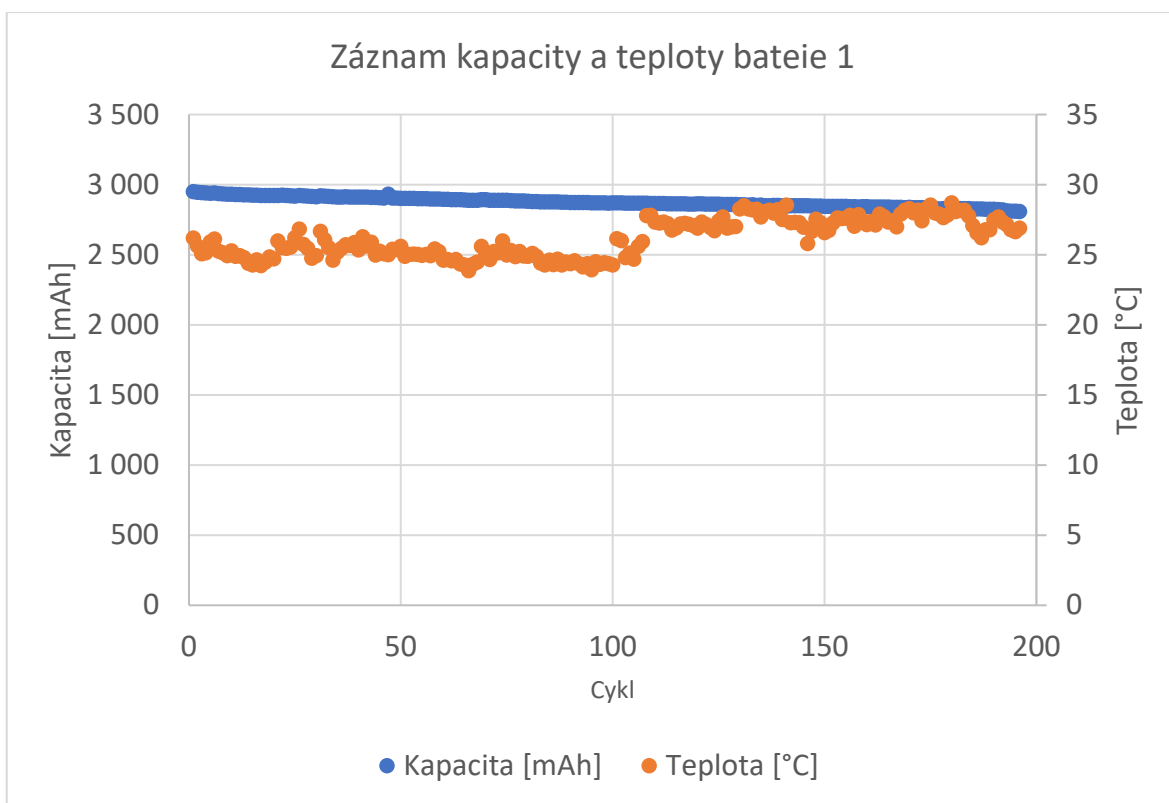


Graf 4.1 Nabíjecí cyklus (15) za pokojové teploty u baterie Goowe



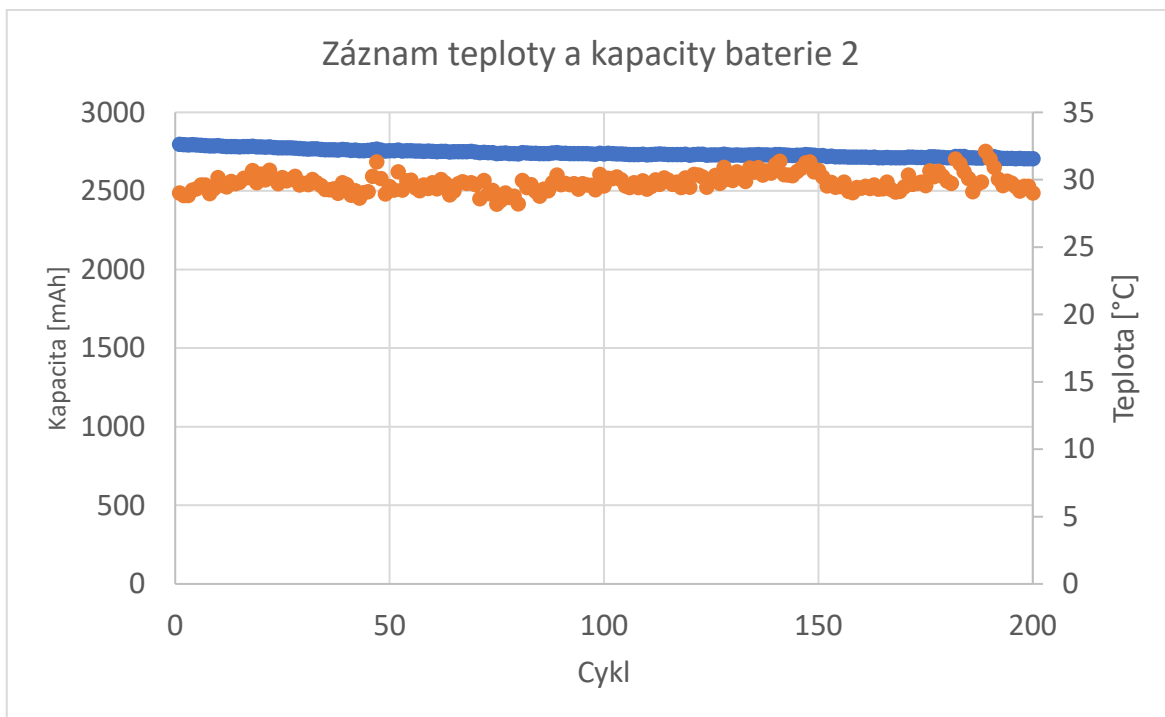
Graf 4.2 Nábojová účinnost baterie 1 Goowe za pokojové teploty

Na Graf 4.3 je záznam poklesu kapacity a vývoj teploty na první baterii, která se proměřovala.

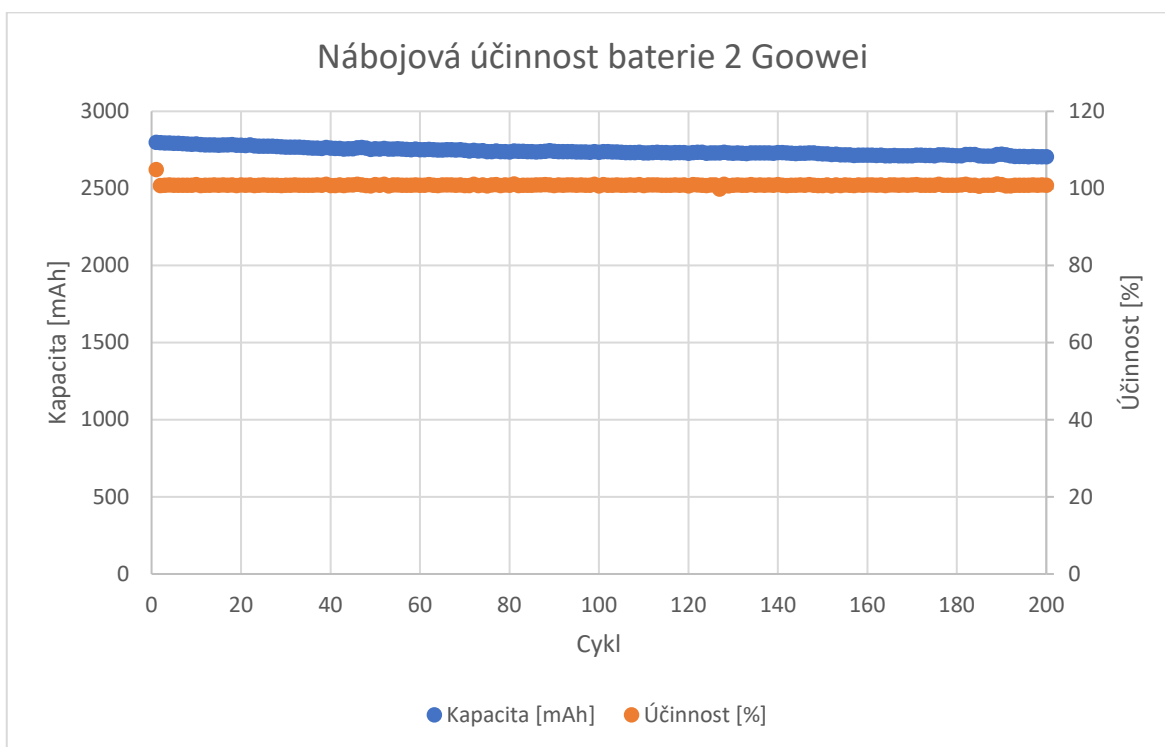


Graf 4.3 Záznam kapacity a teploty u baterie 1 Goowe za pokojové teploty

Tato baterie celkově ztratila 141 mAh. Její reálná kapacita byla na začátku měření 2 949 mAh. Baterie měla horší kapacitu, než výrobce udával. Baterie se zahřála na maximální teplotu 28,7 °C. Toto zahřátí je způsobeno zvyšováním vnitřního odporu baterie. Druhá baterie od společnosti Goowe měla na začátku měření kapacitu 2 796 mAh. Na Graf 4.4 je znázorněn pokles kapacity a záznam teploty baterie.

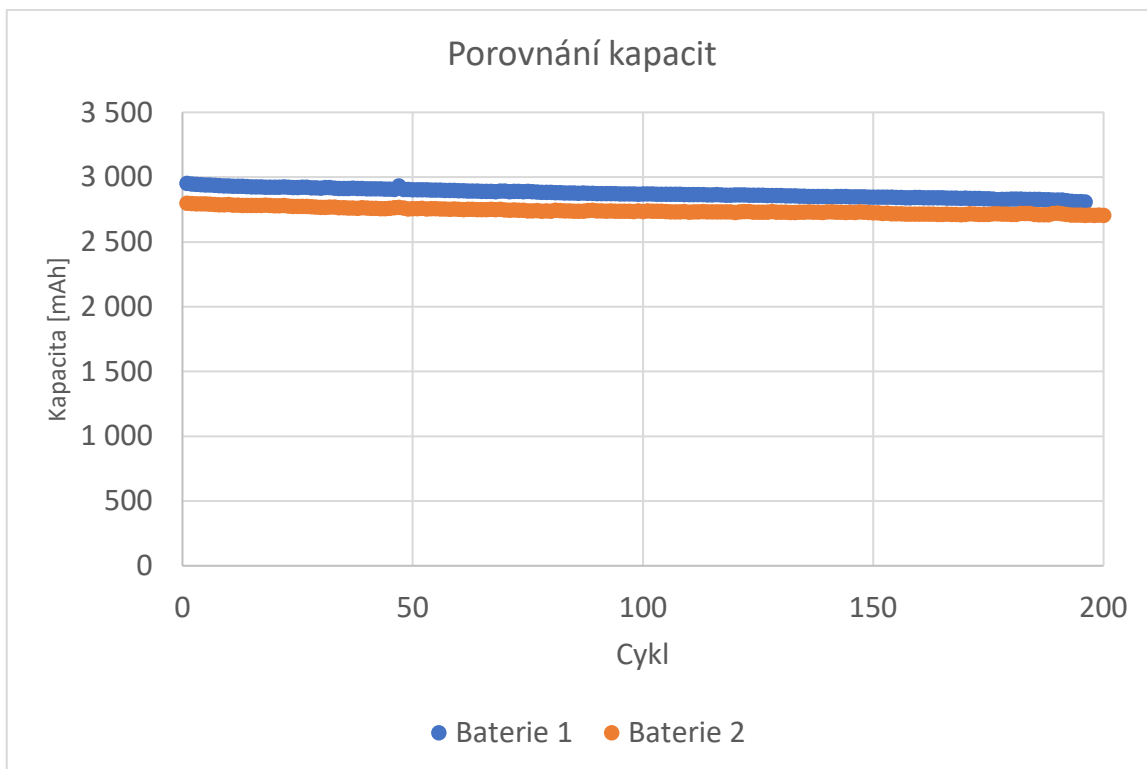


Graf 4.4 Záznam teploty a kapacity u baterie 2 Goowei za pokojové teploty



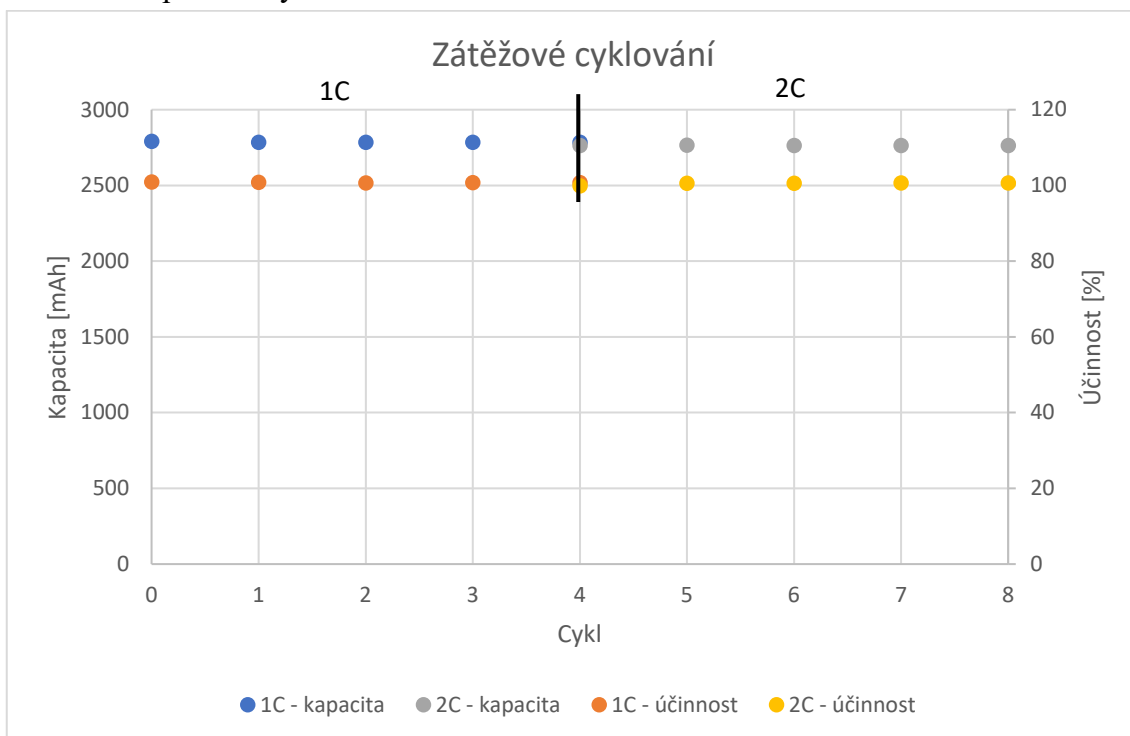
Graf 4.5 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za pokojové teploty

Na Graf 4.6 je porovnání poklesu kapacit dodaných baterií. Na tomto obrázku jde vidět, jak pokles u obou dodaných baterií je stejný.

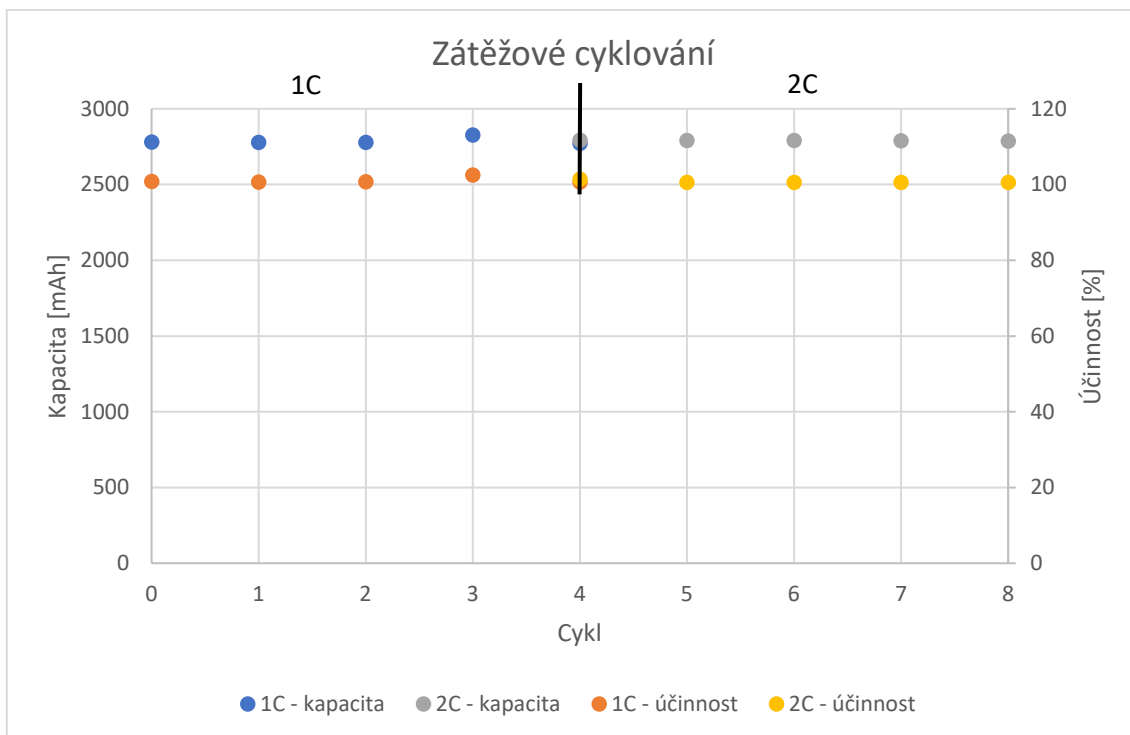


Graf 4.6 Porovnání baterií Goowei za pokojové teploty

Kromě proměřování 200 cyklů, tak baterie byly ještě podrobeny cyklování v celkovém počtu 5 cyklů od 1C do 3C.

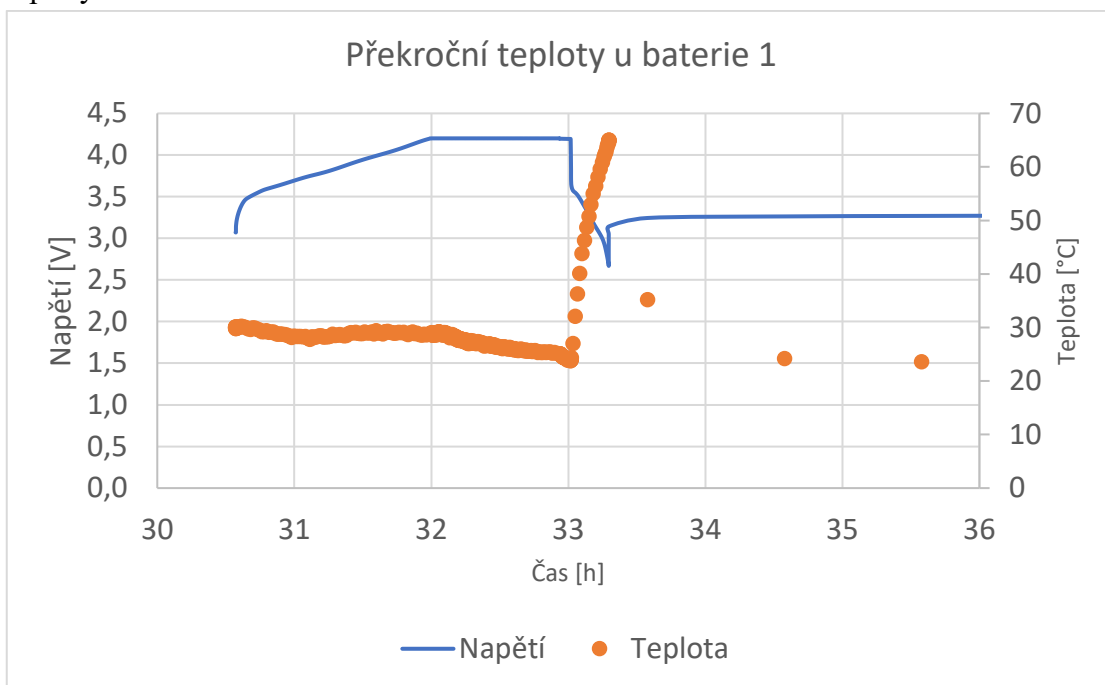


Graf 4.7 Zátěžové cyklování baterie 1 Goowei

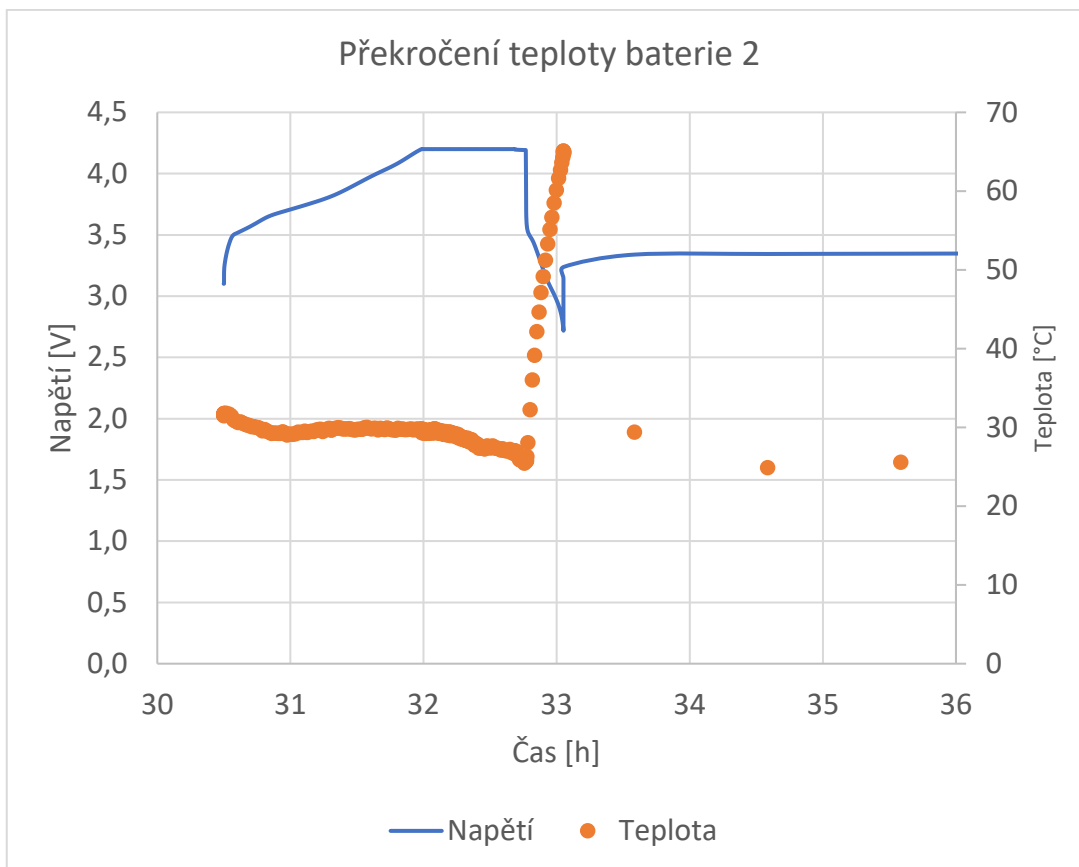


Graf 4.8 Zátěžové cyklování baterie 2 Goawei

Na Graf 4.7 a Graf 4.8 jde vidět, jak s rostoucí zátěží klesá kapacita baterie a také klesá její účinnost. Zatížení 3C nebylo změřeno z důvodu překročení bezpečnostní teploty.



Graf 4.9 Překročení teploty u cyklování 3C u baterie 1 Goawei



Graf 4.10 Překročení teploty zátěžového cyklování 3C u baterie 2 Goowei

Na Graf 4.9 a Graf 4.10 je patrné, že ani jeden z dodaných baterií nedokáže snést zatížení vybíjecím proudem 3C. Při tomto zatížení došlo k překročení bezpečnostní teploty. Tato teplota byla nastavena na 65 °C.

Tabulka 4.2 Přehled naměřených hodnot u baterií Goowei za pokojové teploty.

Změřené údaje – normální teplota - Goowei						
Parametr	Hodnota – baterie 1			Hodnota – baterie 2		
	200 Cyklů	1C	2C	200 Cyklů	1C	2C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2 949,98	2 791,85	2 764,41	2 796,95	2 779,62	2 791,84
Kapacita na konci měření [mAh]	2 808,55	2 784,56	2 762,97	2 704,06	2 772,27	2 786,08
Ztráta kapacity po cyklování [mAh]	141,43	7,29	1,44	92,89	7,35	5,76
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	4,79	0,26	0,05	3,32	0,26	0,21
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	7,81	12,75	13,61	12,60	13,14	12,76
Teplota na začátku měření [°C]	26,18	29,89	42,40	29,01	33,86	44,12
Teplota na konci měření [°C]	26,88	31,53	42,63	29,01	33,39	43,46
Minimální teplota [°C]	23,85	29,89	41,85	28,18	33,39	43,46
Maximální teplota [°C]	28,70	31,86	42,63	32,09	34,06	44,33
Teplotní rozdíl [°C]	4,85	1,98	0,79	3,91	0,67	0,87

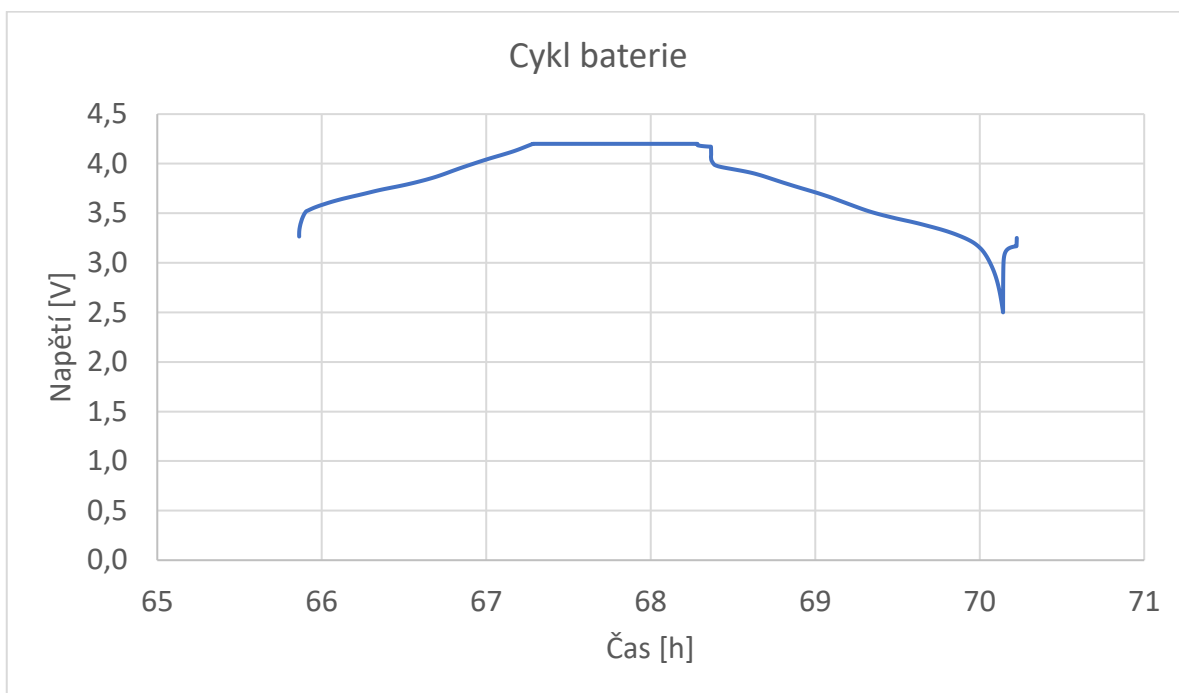
LGEB MH1 18650 baterie

Baterie od společnosti LG s kódovým označením LGEB MH1 18650 mají definovanou kapacitu 3200 mAh. Jejich maximální nabíjecí napětí je 4,2 V a maximální nabíjecí proud je 3100 mA. Maximální vybíjecí proud je udáván 10 A. Tyto údaje jsou vypsány v Tabulka 4.3.

Tabulka 4.3 Údaje udávané výrobcem k baterii LGEB.

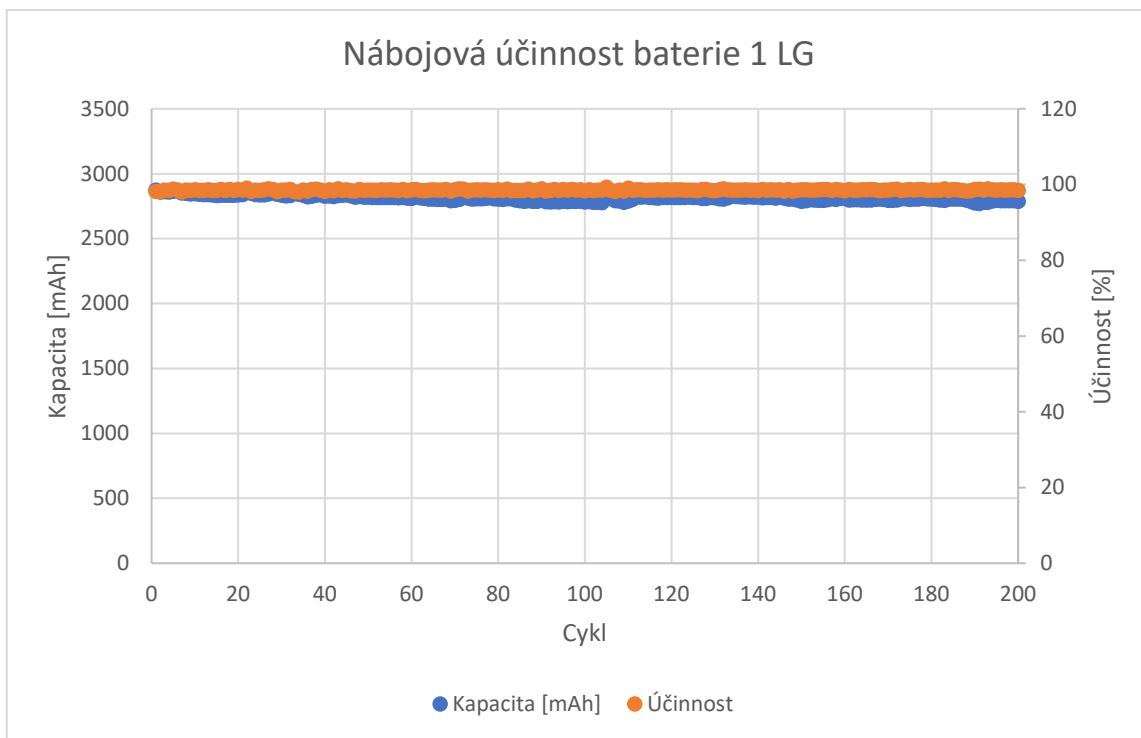
Údaje udané výrobcem		
Položka	Stav / Poznámka	Specifikace
Energie	Standartní nabíjení / vybíjení	Nominální [mAh] 3200
		Minimum [mAh] 3100
Minimální napětí	Průměr	3,67 [V]
Standartní nabíjení	Konstantní proud	0,5C (1550 mA)
	Konstantní napětí	4,2 [V]
	Koncový proud (přerušení)	50 [mA]
Maximální nabíjecí napětí		4,2 ± 0,05 [V]
Maximální nabíjecí proud		1,0C (3100 mA)
Standartní vybíjení	Konstantní proud	0,2 C (620 mA)
	Koncové napětí (přerušení)	2,5 [V]
Maximální vybíjecí proud		10 [A]

Při cyklování 200 cyklů byl nastaven nabíjecí proud na 1,6 A a napětí na baterii 4,2 V. Vybíjecí proud byl nastaven na 1,6 A a baterie se vybíjela na hodnotu 2,5 V. Průběh nabíjecího cyklu je vyobrazen na Graf 4.11. Byl zvolen cyklus s pořadovým číslem 15.

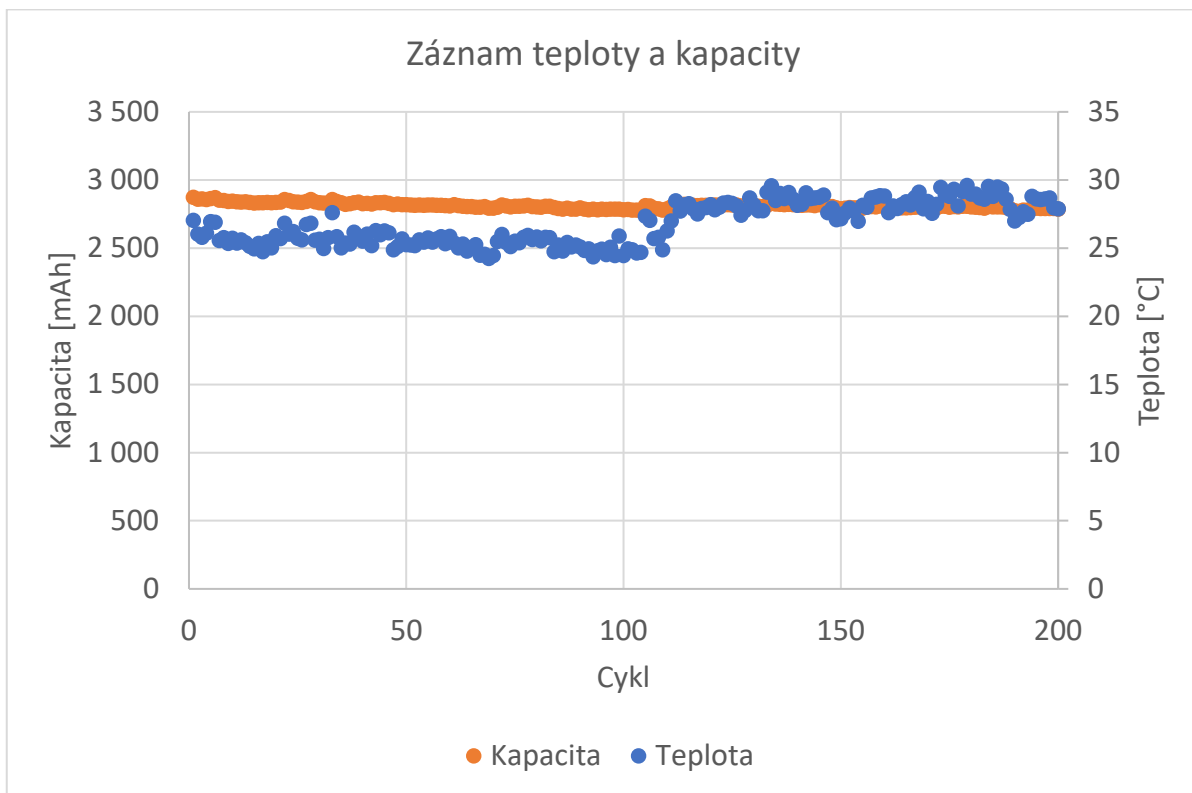


Graf 4.11 Ukázka cyklu (15) u baterie LG za pokojové teploty

Na Graf 4.13 je záznam poklesu kapacity a vývoj teploty na první baterii, která se proměřovala za pokojové teploty. Jde vidět nepatrný nárůst teploty a pokles kapacity.

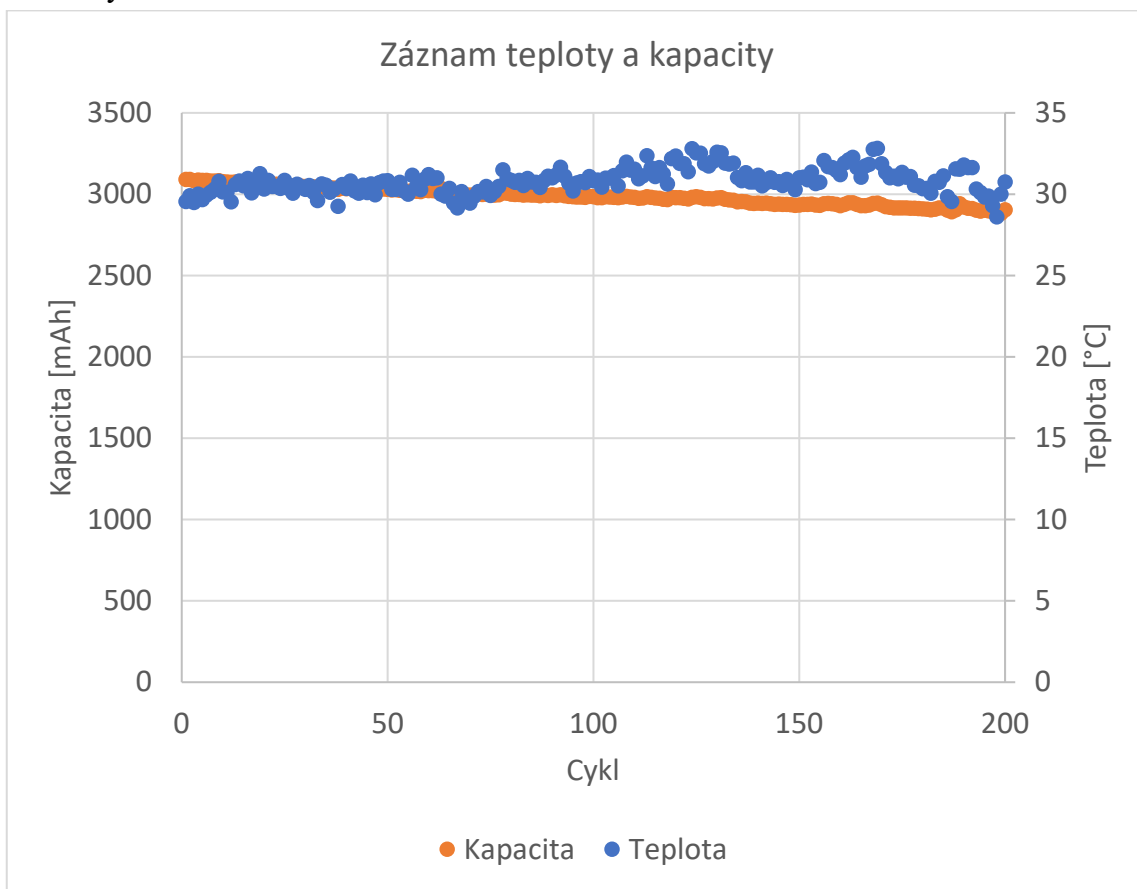


Graf 4.12 Nábojová účinnost baterie 1 LG za pokojové teploty

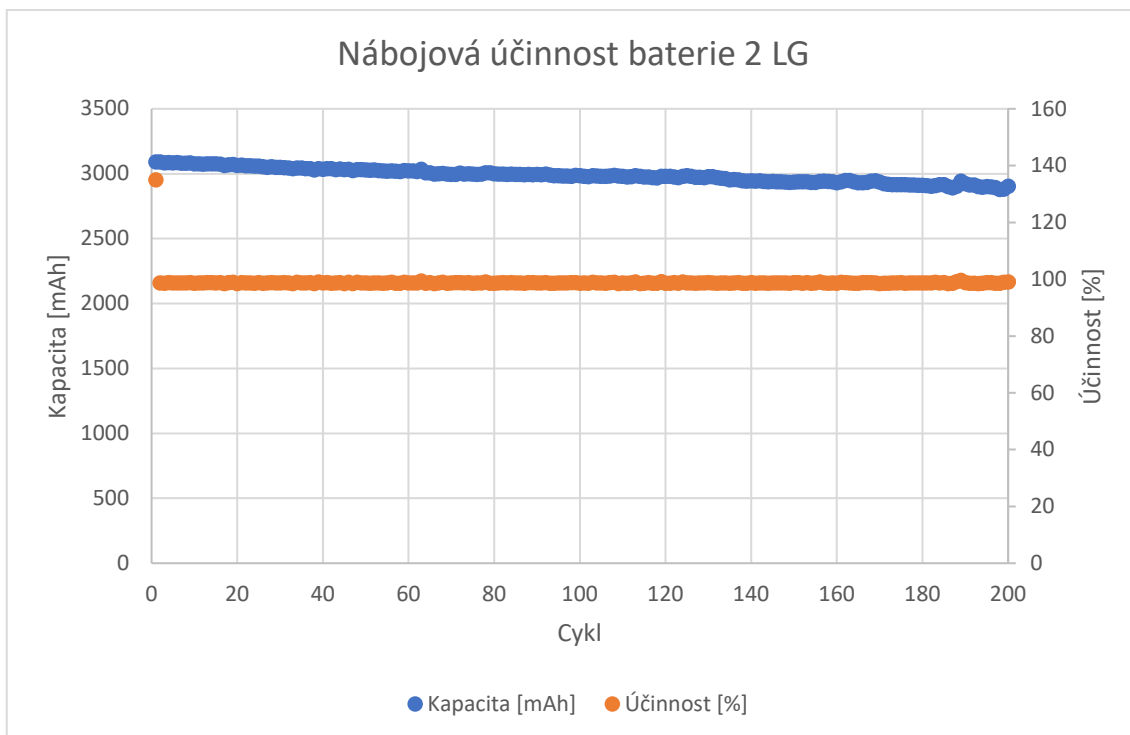


Graf 4.13 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za pokojové teploty

Baterie měla na začátku měření kapacitu 2872 mAh a na konci 200 cyklů měla kapacitu 2727 mAh. Pokles kapacity byl 145 mAh. Baterie měla menší kapacitu, než udává výrobce baterie.

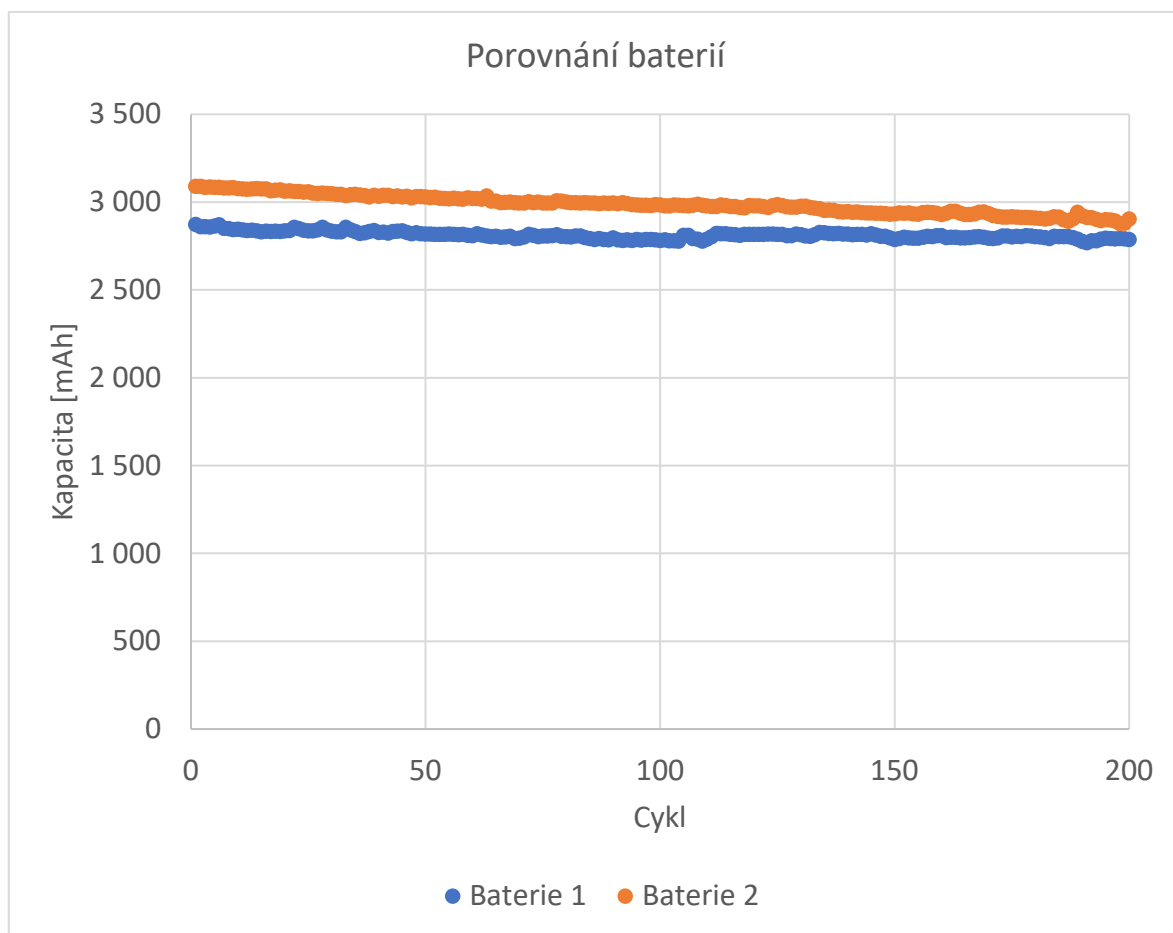


Graf 4.14 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za pokojové teploty



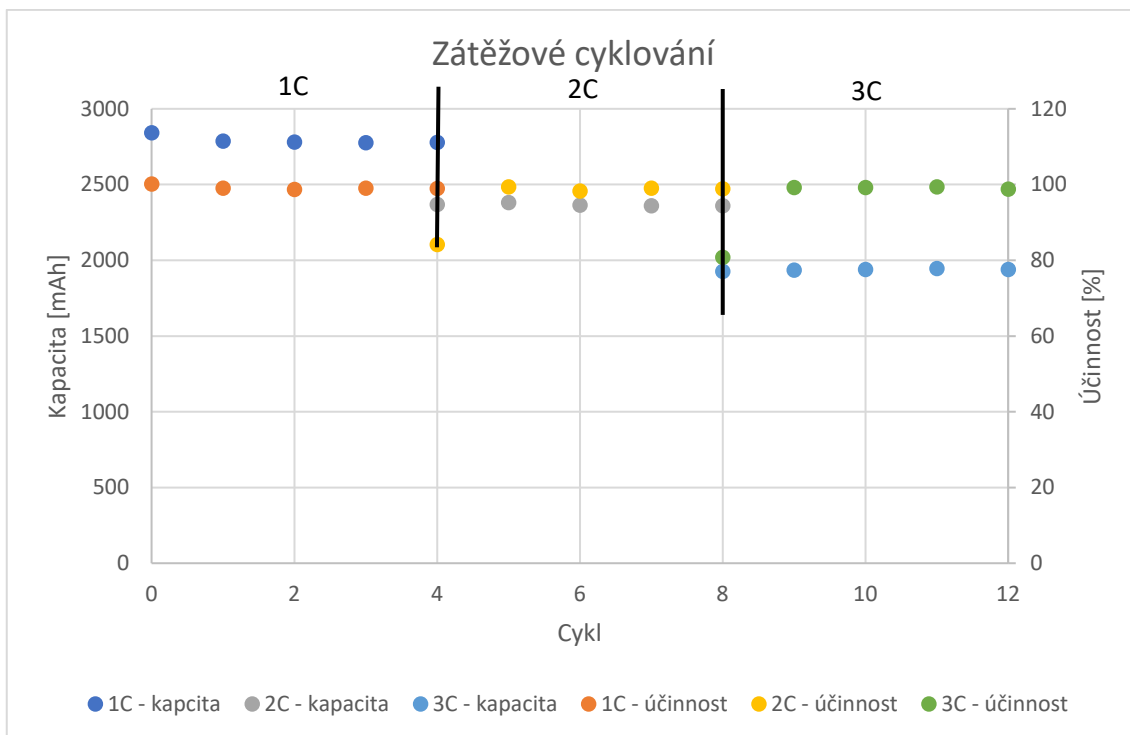
Graf 4.15 Nábojová účinnost baterie 2 LG za pokojové teploty

Na Graf 4.14 je znázorněn vývoj poklesu kapacity a růst teploty na druhé baterii od společnosti LG. Stejně jako první baterie, tak tato baterie měla menší kapacitu, než udává výrobce. Na začátku měření měla baterie kapacitu 3089 mAh a na konci měření 200 cyklů měla kapacitu 2903 mAh. Tato baterie má oproti první baterii větší kapacitu.

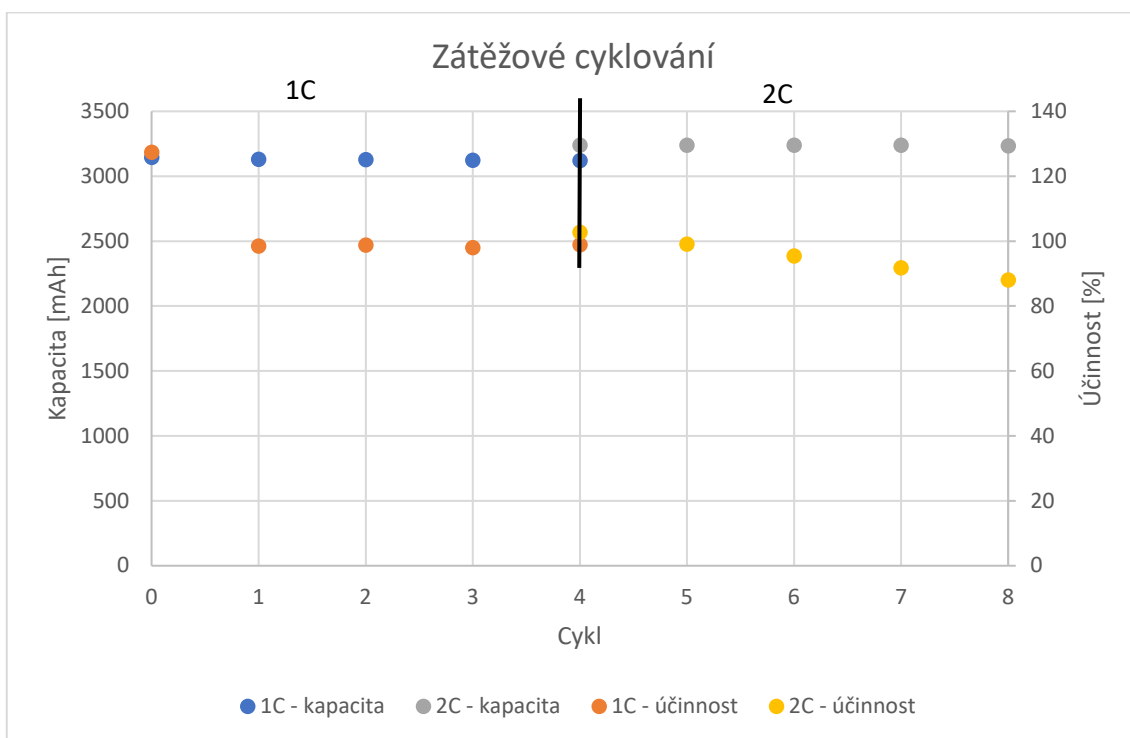


Graf 4.16 Porovnání baterií LG za pokojové teploty

Na Graf 4.16 je znázorněn pokles kapacit za pokojové teploty a baterií LG. Jejich pokles je podobný.



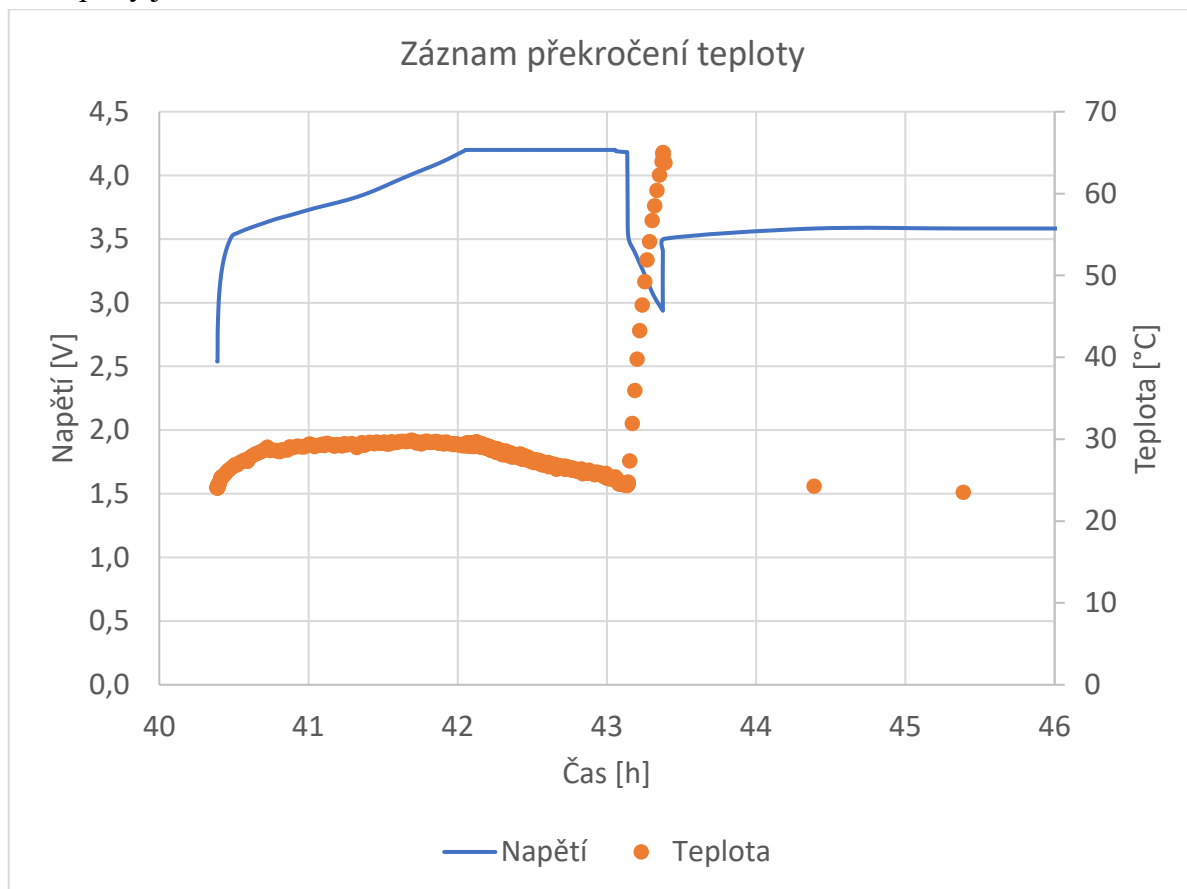
Graf 4.17 Zátěžové cyklování baterie 1 LG za pokojové teploty



Graf 4.18 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za pokojové teploty

Graf 4.17 a Graf 4.18 znázorňuje zátěžové cyklování. Když se tyto obrázky porovnají, tak se zjistí, že baterie 2 od společnosti LG nedokázala zvládnout zatížení

3C a měření se přerušilo z důvodu překročení bezpečnostní teploty. Toto překročení teploty je zaznamenáno na Graf 4.19.



Graf 4.19 Překročení teploty při zátěžovém cyklování baterie 2 LG

Tabulka 4.4 Přehled naměřených hodnot u baterií od LG za pokojových teplot.

Změřené údaje - normální teplota -LG							
Parametr	Hodnota - sada 1				Hodnota - sada 2		
	200 Cyklů	1C	2C	3C	200 Cyklů	1C	2C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2872,9 4	2842, 04	2368, 42	1925, 15	3089,7 2	3145, 46	3237, 80
Kapacita na konci měření [mAh]	2727,2 0	2778, 09	2358, 28	1939, 69	2903,1 2	3119, 50	3233, 92
Ztráta kapacity [mAh]	145,74	63,95	10,14	- 14,53	186,60	25,96	3,88
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	5,07	2,25	0,43	-0,75	6,04	0,83	0,12
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	10,22	11,19	25,99	39,84	3,45	1,70	-1,18
Teplota na začátku měření [°C]	27,04	32,82	42,02	50,35	29,55	35,23	25,93
Teplota na konci měření [°C]	25,78	33,22	42,69	50,36	30,75	35,00	24,97
Minimální teplota [°C]	24,24	32,01	42,02	50,35	28,60	34,97	24,97
Maximální teplota [°C]	29,60	34,49	43,37	51,01	32,82	35,23	25,99
Teplotní rozdíl [°C]	5,36	2,48	1,35	0,66	4,22	0,26	1,02

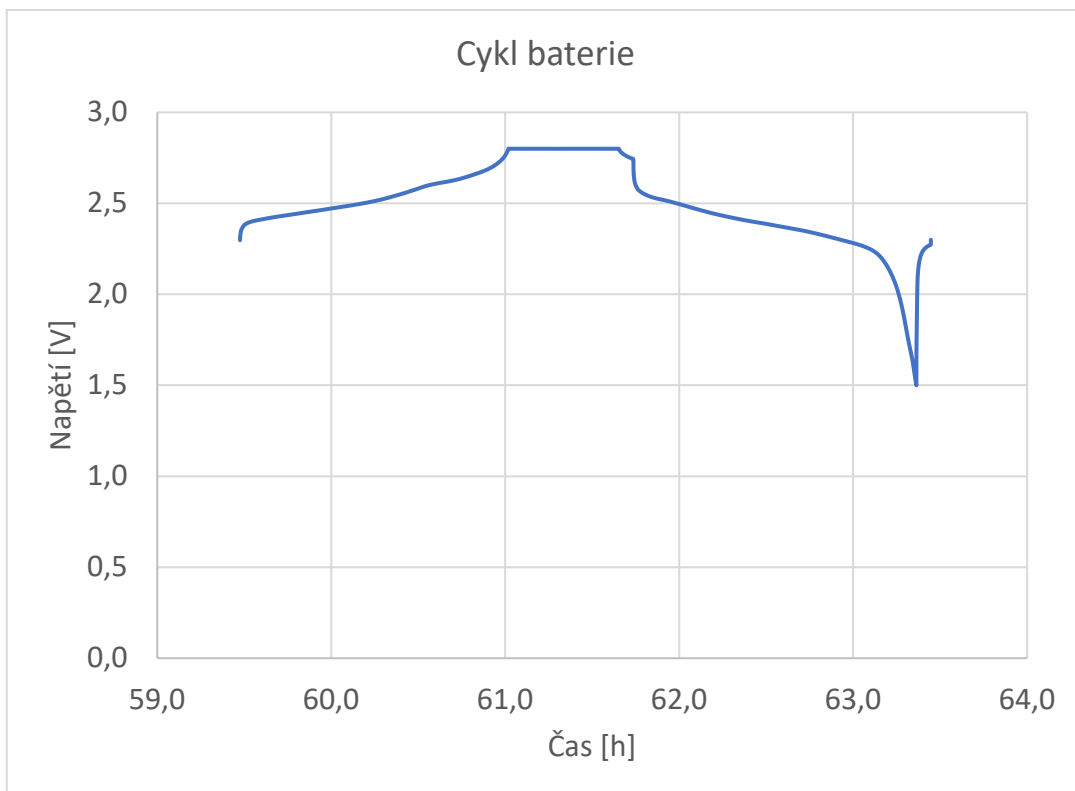
GWL LTO baterie

Baterie od společnosti GWL má definovanou kapacitu 1300 mAh. Její maximální nabíjecí napětí je 2,8 V a maximální nabíjecí proud je oproti ostatním bateriím 6 A. Maximální vybíjecí proud je 13 A. Všechny tyto údaje jsou napsány v Tabulka 4.5.

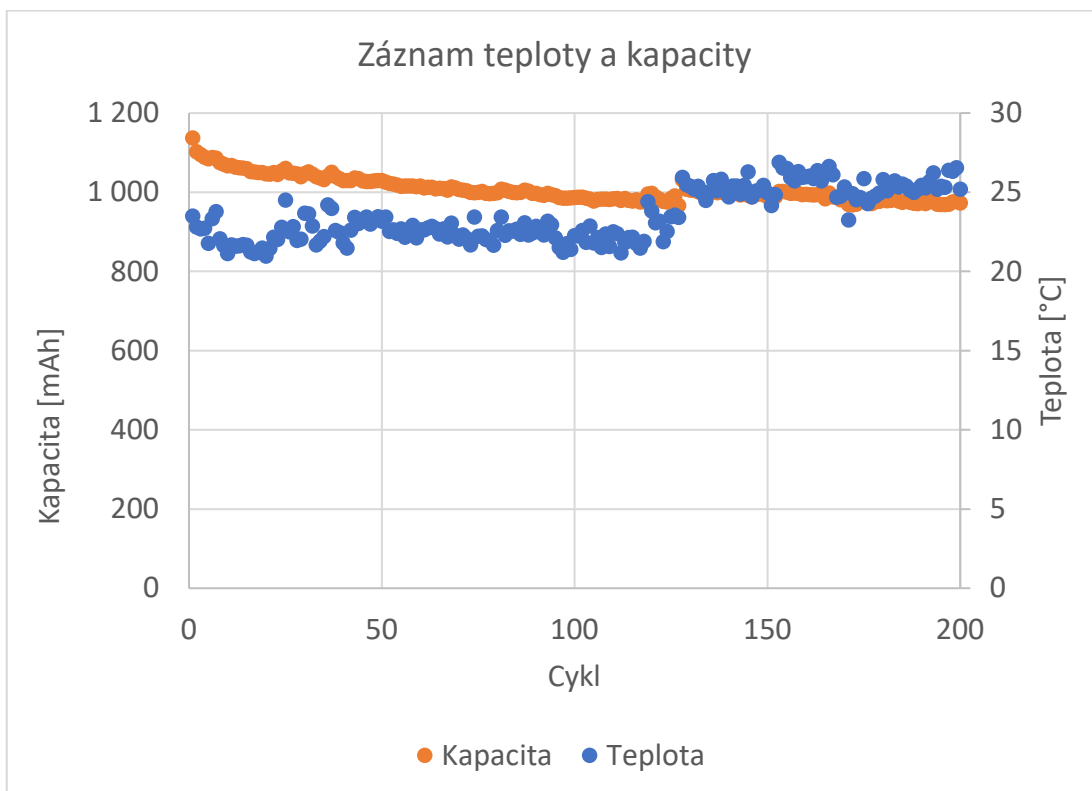
Tabulka 4.5 Údaje udávané výrobcem baterie LTO

Údaje udané výrobcem		
Položka	Stav / Poznámka	Specifikace
Energie	Standartní nabíjení / vybíjení	Nominální [mAh] 1300
		Minimum [mAh] 1250
Nominální napětí		2,4 [V]
Maximální napětí		2,8 [V]
Vybíjecí napětí		1,85 [V]
Minimální napětí		1,5 [V]
Standartní nabíjení	Konstantní proud	1C (1300 mA)
	Konstantní napětí	2,85 [V]
	Koncový proud (přerušení)	26 [mA]
Maximální nabíjecí proud		5,0C (6000 mA)
Standartní vybíjení	Konstantní proud	1 C (1,3 A)
Maximální vybíjecí proud		10C (13 A)

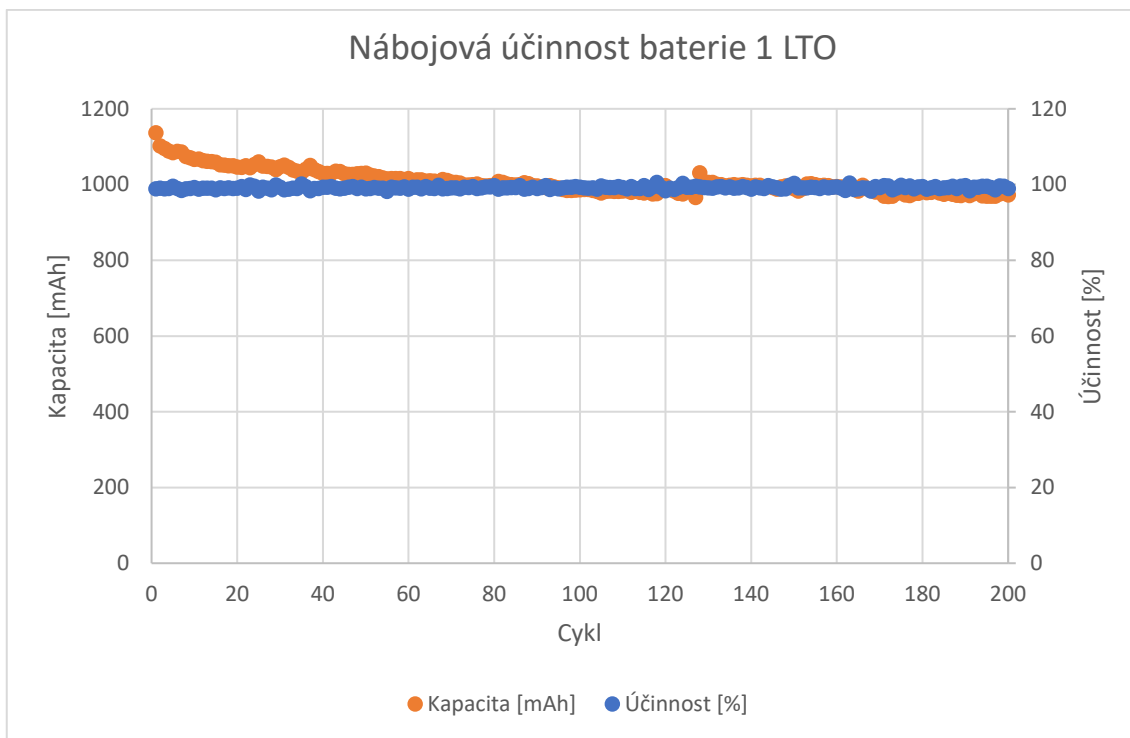
Při cyklování 200 cykly byl nastaven nabíjecí proud na 0,65 A a napětí na baterii 2,8 V. Vybíjecí proud byl nastaven na 0,65 A baterie se vybíjela na hodnotu 1,5 V. Průběh nabíjecího cyklu je vyobrazen na Graf 4.20. Byl zvolen cyklus s pořadovým číslem 15.



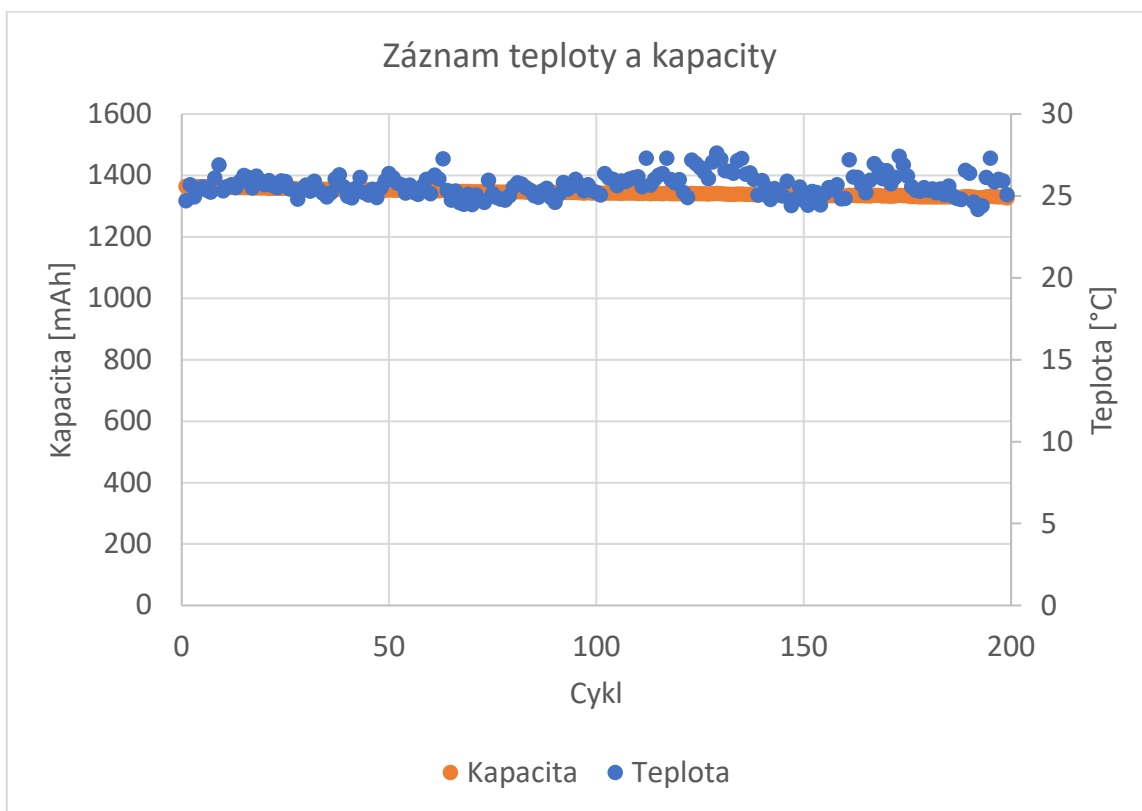
Graf 4.20 Ukázka cyklu (15) baterie LTO za pokojové teploty



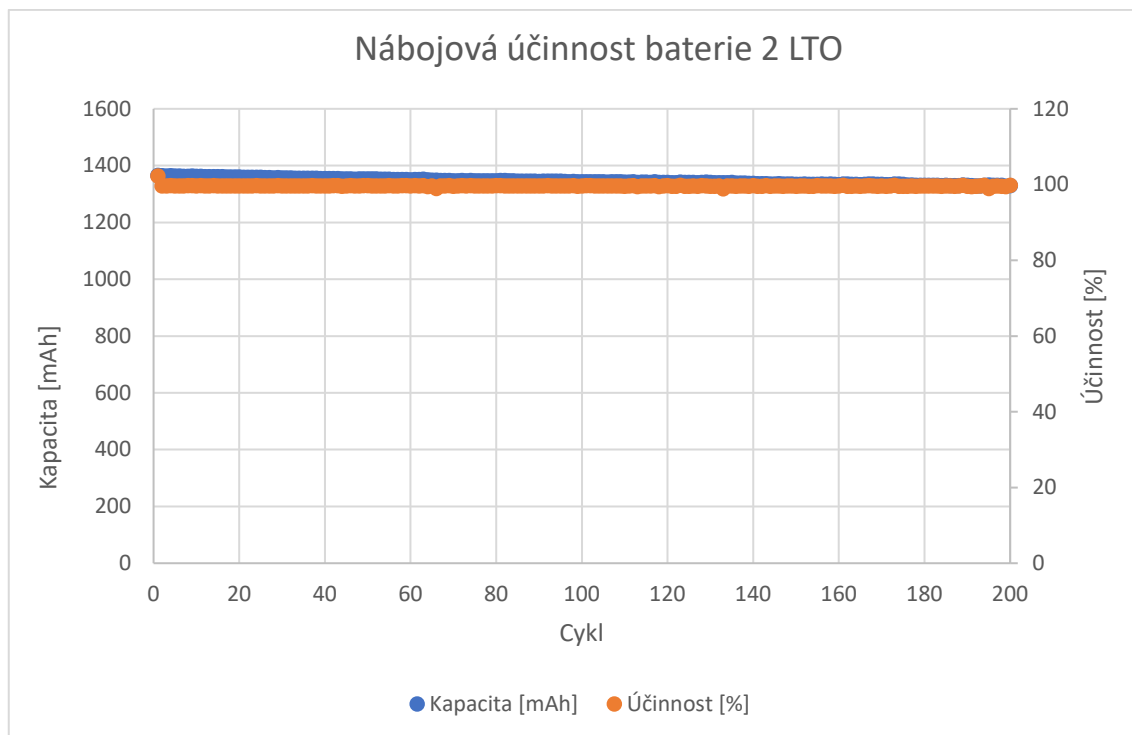
Graf 4.21 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za pokojové teploty



Graf 4.22 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za pokojové teploty

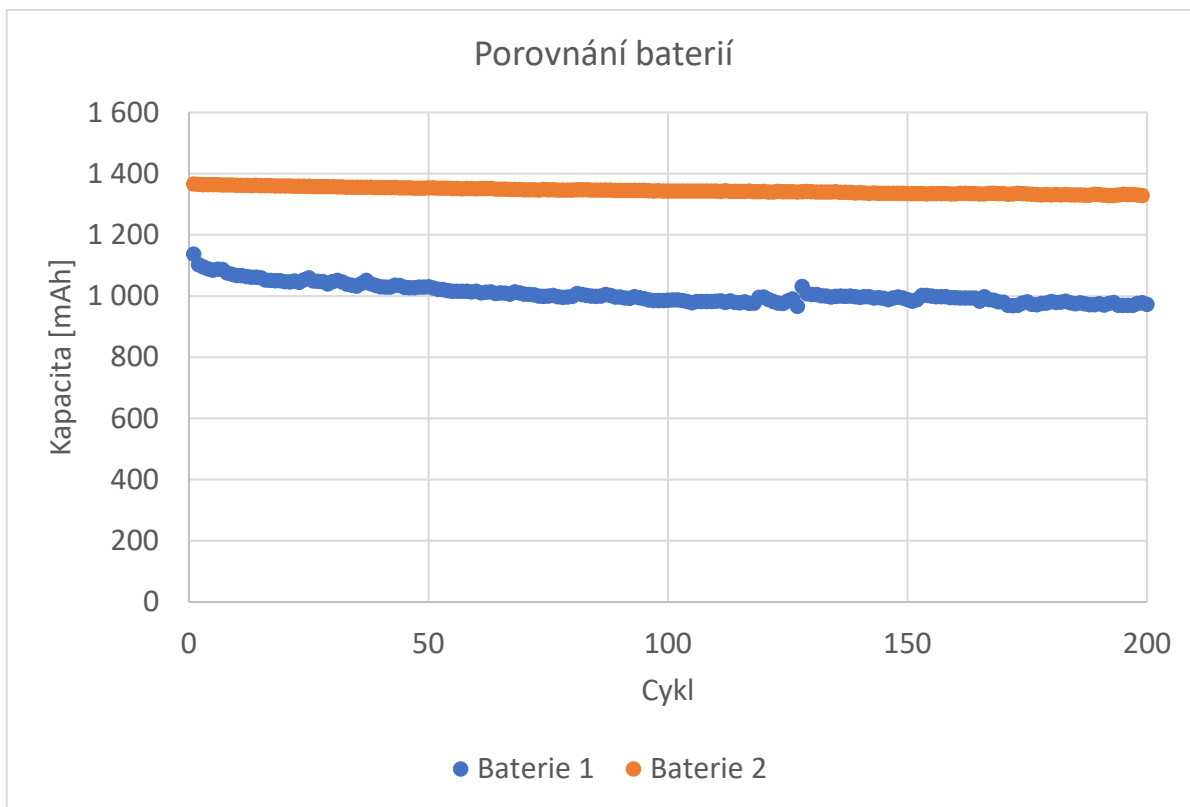


Graf 4.23 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za pokojové teploty



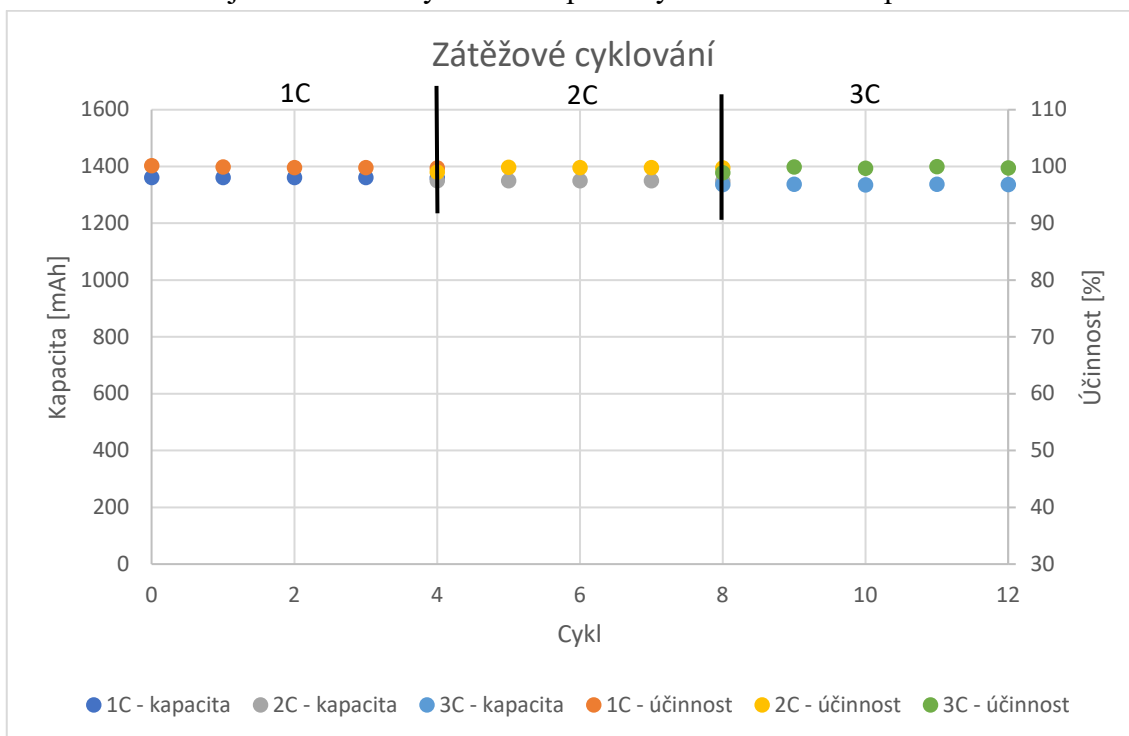
Graf 4.24 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za pokojové teploty

Na Graf 4.21 a Graf 4.23 jsou znázorněny průběhy cyklování se zaznamenáváním teploty a kapacity. Na Graf 4.25 je porovnání baterií od společnosti GWL. První baterie měla na začátku měření 1136 mAh a na konci měření měl kapacitu 960 mAh. Druhá baterie měla na začátku měření 1365 mAh a na konci 1329 mAh. Z těchto hodnot vyplývá, že druhá baterie je kvalitnější.



Graf 4.25 Porovnání baterií LTO za pokojové teploty

Na Graf 4.26 jsou znázorněny zátěžové průběhy na baterii 2 od společnosti GWL.



Graf 4.26 Zátěžové cyklování baterie 2 LTO za pokojové teploty

Tabulka 4.6 Porovnání naměřených hodnot baterií GWL za pokojové teploty.

Změřené údaje - normální teplota -GWL LTO					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	1136,36	1365,07	1360,34	1348,78	1335,50
Kapacita na konci měření [mAh]	960,40	1329,31	1359,58	1347,89	1335,41
Ztráta kapacity [mAh]	175,97	35,76	0,76	0,90	0,09
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	15,49	2,62	0,06	0,07	0,01
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	12,59	-5,01	-4,64	-3,75	-2,73
Teplota na začátku měření [°C]	23,49	24,71	26,54	28,31	31,46
Teplota na konci měření [°C]	25,83	25,12	26,23	27,73	30,09
Minimální teplota [°C]	20,97	24,18	26,15	27,73	29,75
Maximální teplota [°C]	26,98	27,62	26,69	29,37	31,46
Teplotní rozdíl [°C]	6,01	3,44	0,54	1,64	1,70

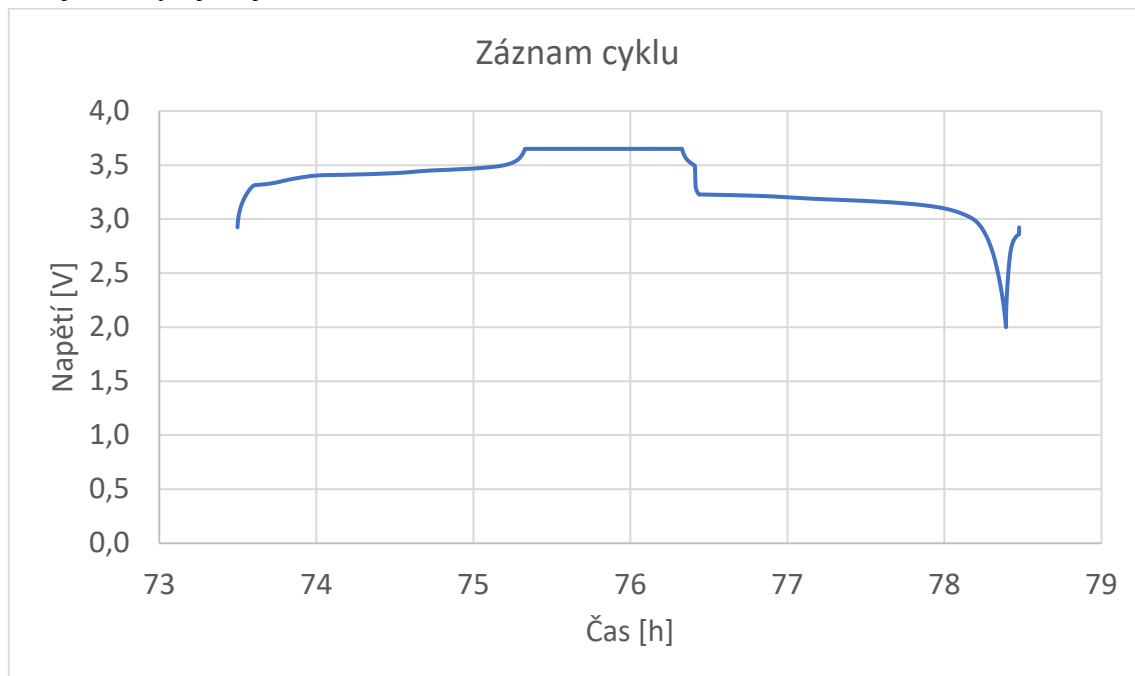
LiFePO₄ baterie

Baterie typu LiFePO₄ má definovanou kapacitu výrobcem 3300 mAh. Maximální nabíjecí napětí je 3,65 V a maximální vybíjecí proud je 10 A. Všechny tyto údaje jsou zaneseny v tabulce 4.7.

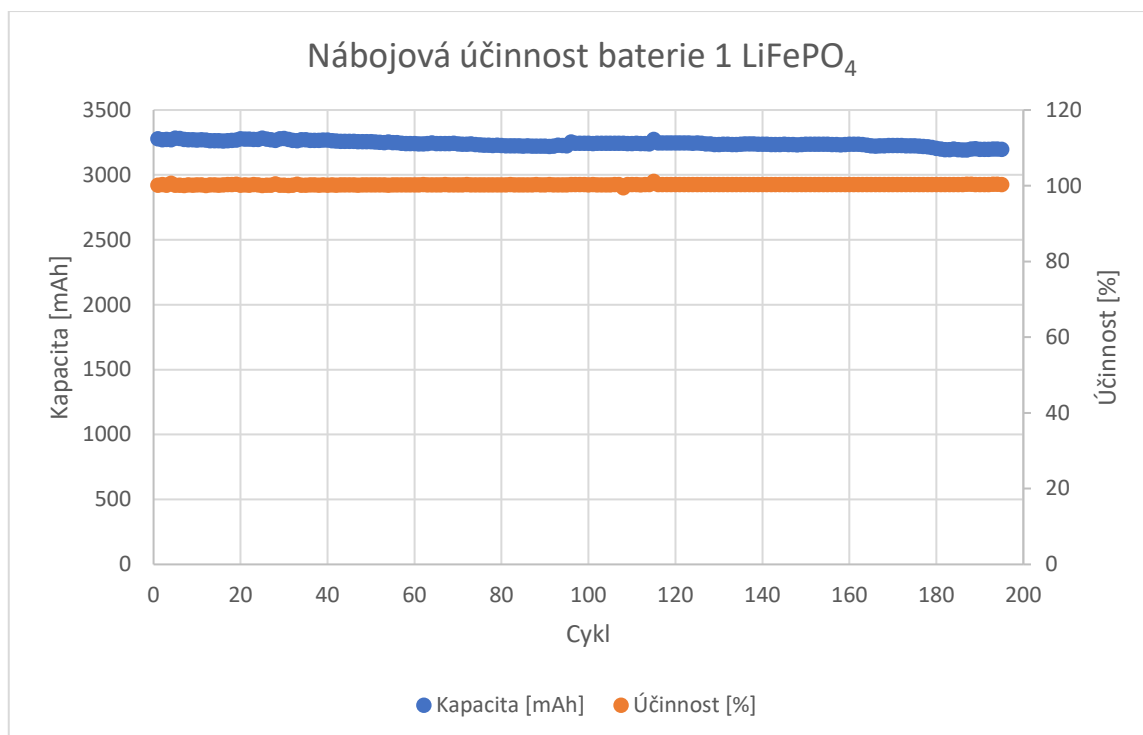
Tabulka 4.7 Údaje udávané výrobcem baterie LiFePO₄.

Údaje udané výrobcem		
Položka	Stav / Poznámka	Specifikace
Energie	Standartní nabíjení / vybíjení	Nominální [mAh] 3300
		Minimum [mAh] 3200
Nabíjecí vypínací napětí		3,65 [V]
Nominální napětí		3,2 [V]
Standartní nabíjení	Konstantní proud	1C
	Konstantní napětí	3,65[V]
Maximální nabíjecí proud		2,0C
Standartní vybíjení	Konstantní proud	0,2 C (620 mA)
	Koncové napětí (přerušení)	2 [V]
Maximální vybíjecí proud		10 [A]

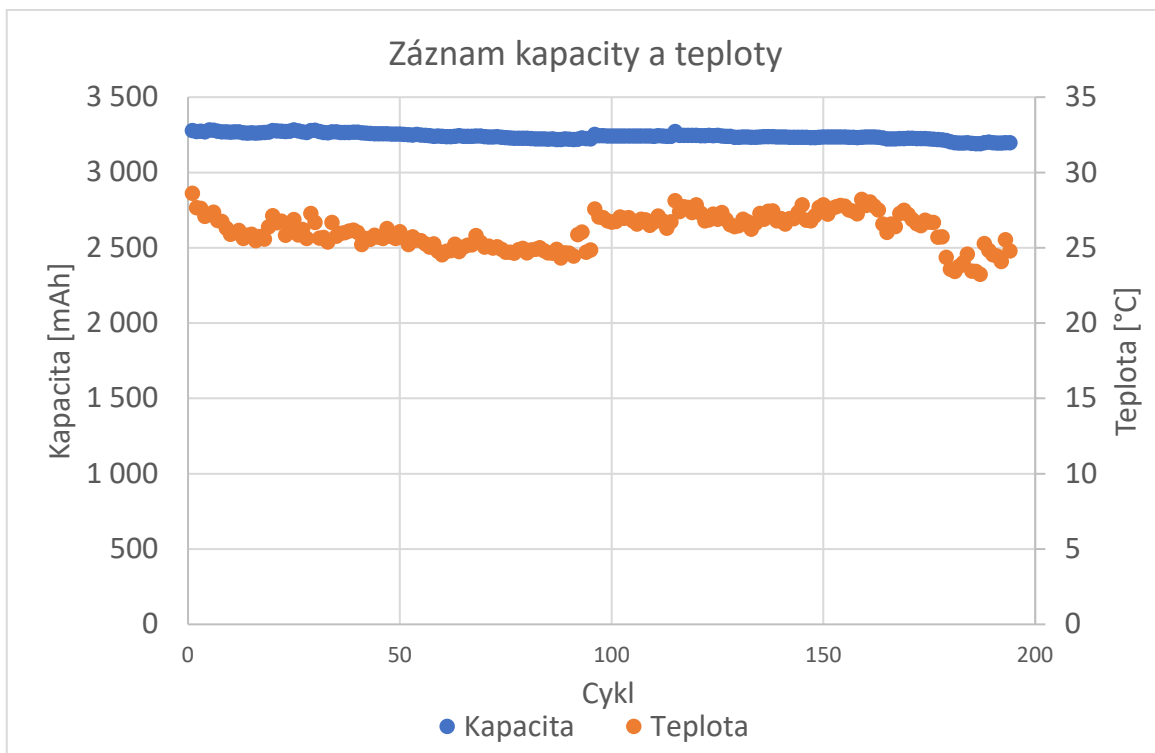
Při cyklování 200 cyklů byl nastaven nabíjecí proud na 1,65 A a napětí na baterii 3,65 V. Vybíjecí proud byl nastaven na 1,65 A, baterie se vybíjela na hodnotu 2 V. Průběh nabíjení a vybíjení je znázorněn na Graf 4.27.



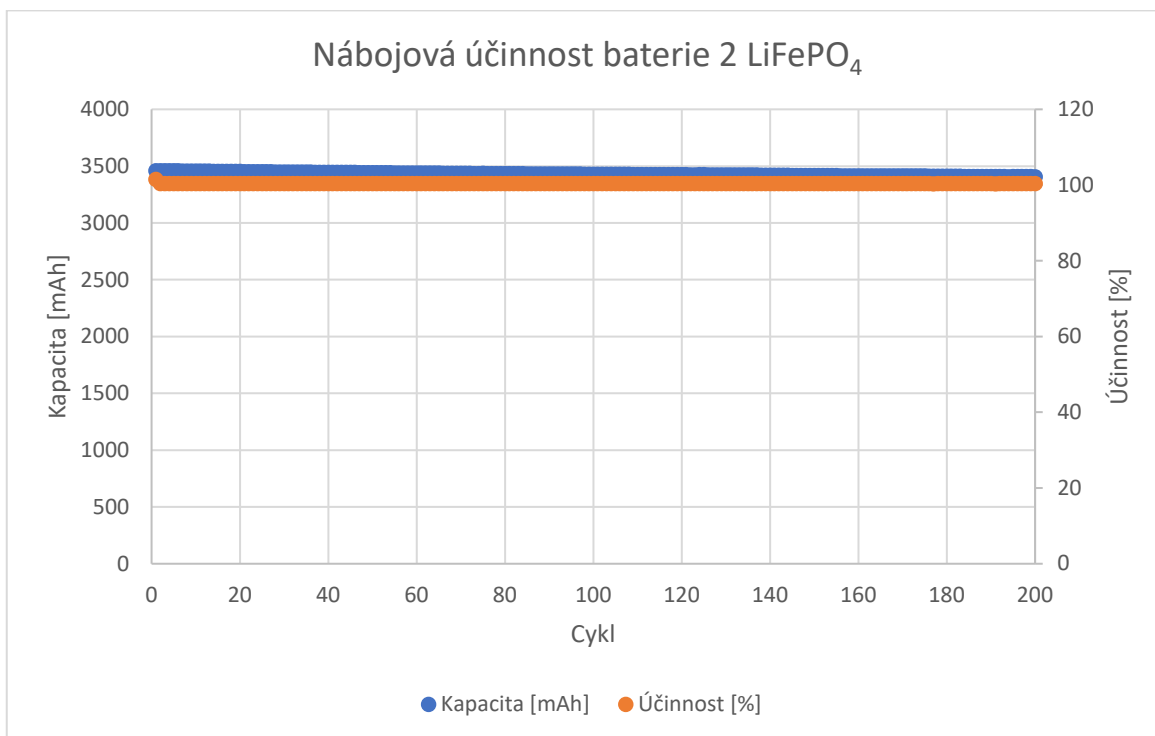
Graf 4.27 Ukázka cyklu (15) baterie LiFePO₄ za pokojové teploty



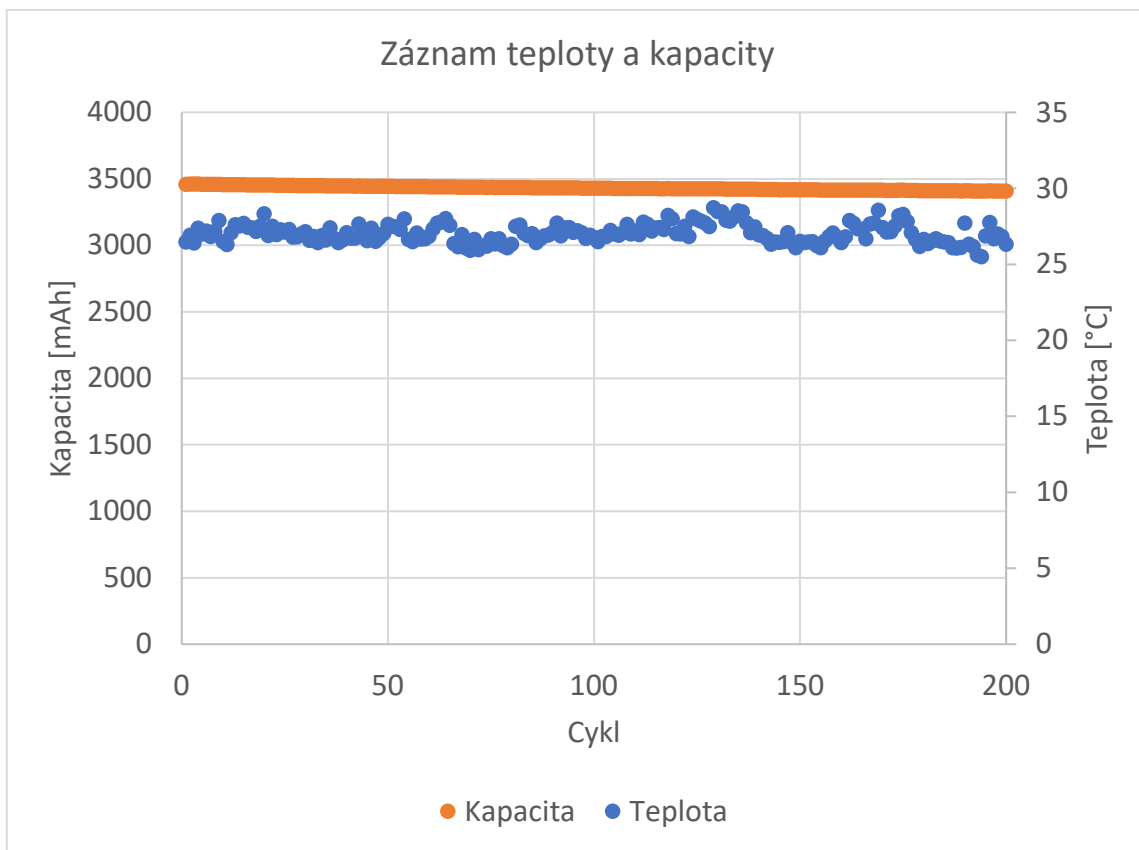
Graf 4.28 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO₄ za pokojové teploty



Graf 4.29 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO₄ za pokojové teploty

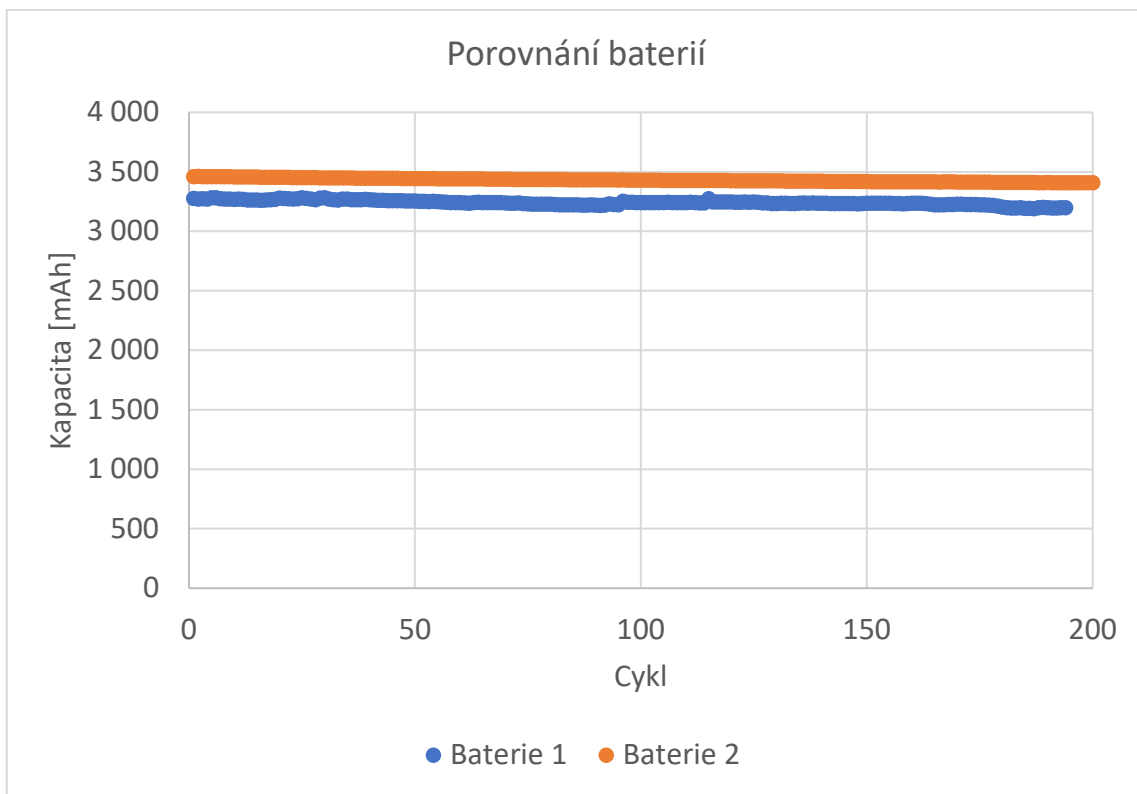


Graf 4.30 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO₄ za pokojové teploty

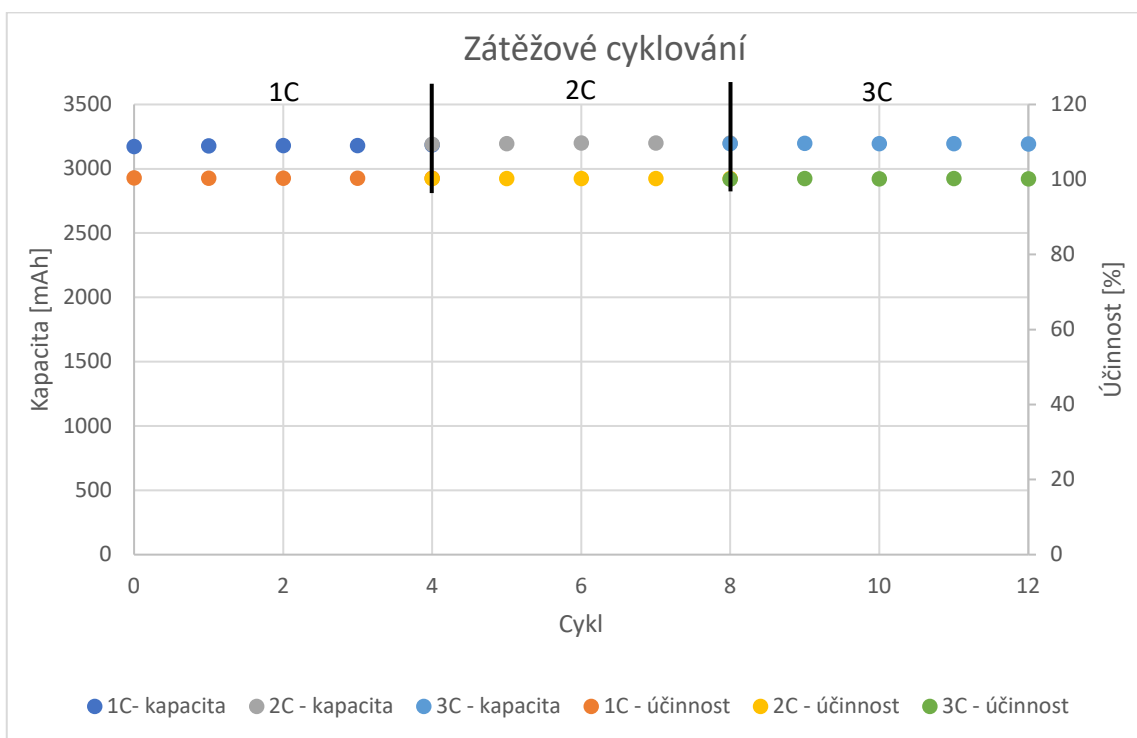


Graf 4.31 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO₄ za pokojové teploty

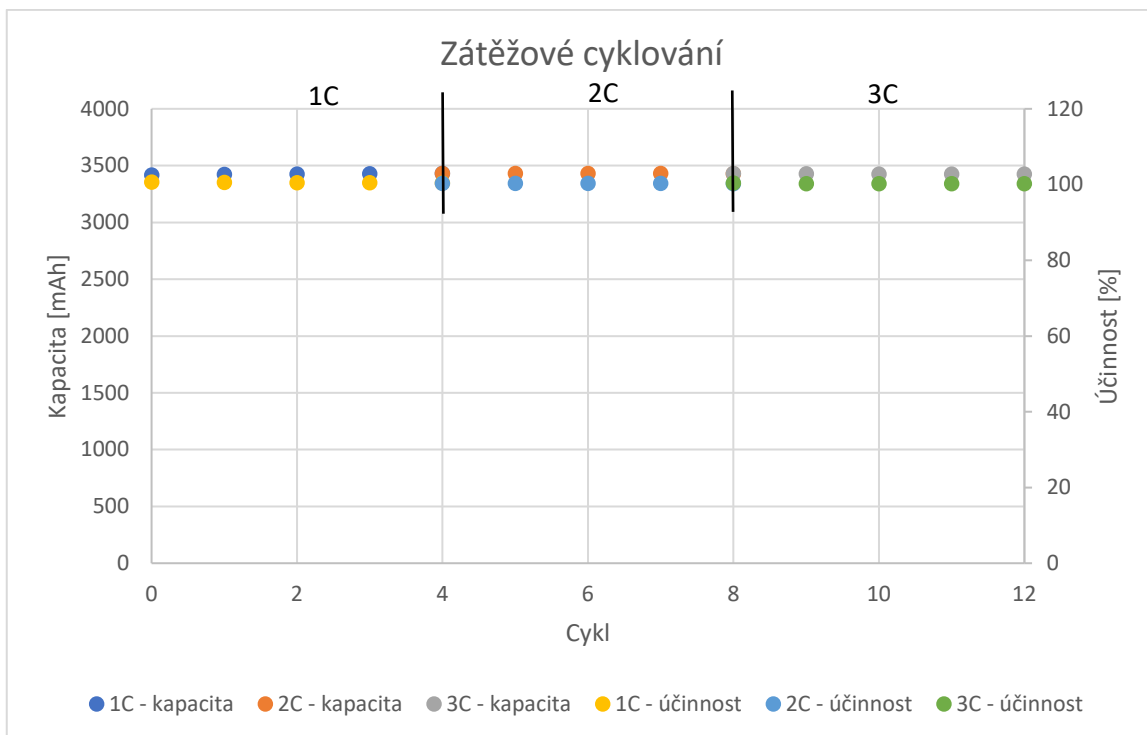
Na Graf 4.29 a Graf 4.31 jsou znázorněny záznamy teploty a kapacity na bateriích LiFePO₄. Jde vidět, že kapacita první baterie měla na začátku cyklování 3276 mAh a na konci 3197 mAh. Druhá baterie měla na začátku kapacitu 3458 mAh a na konci cyklování 3406 mAh. Lze říci, že baterie měly malý pokles kapacity.



Graf 4.32 Porovnání baterií LiFePO₄ za pokojové teploty



Graf 4.33 Zátěžové cyklování baterie 1 LiFePO₄ za pokojové teploty



Graf 4.34 Zátěžové cyklování baterie 2 LiFePO4 za pokojové teploty

Na Graf 4.33 a Graf 4.34 je záznam zátěžových testů. Při těchto testech nejevila žádný razantní pokles kapacity.

Tabulka 4.8 Tabulka naměřených hodnot baterií typu LiFePO₄ za pokojových teplot.

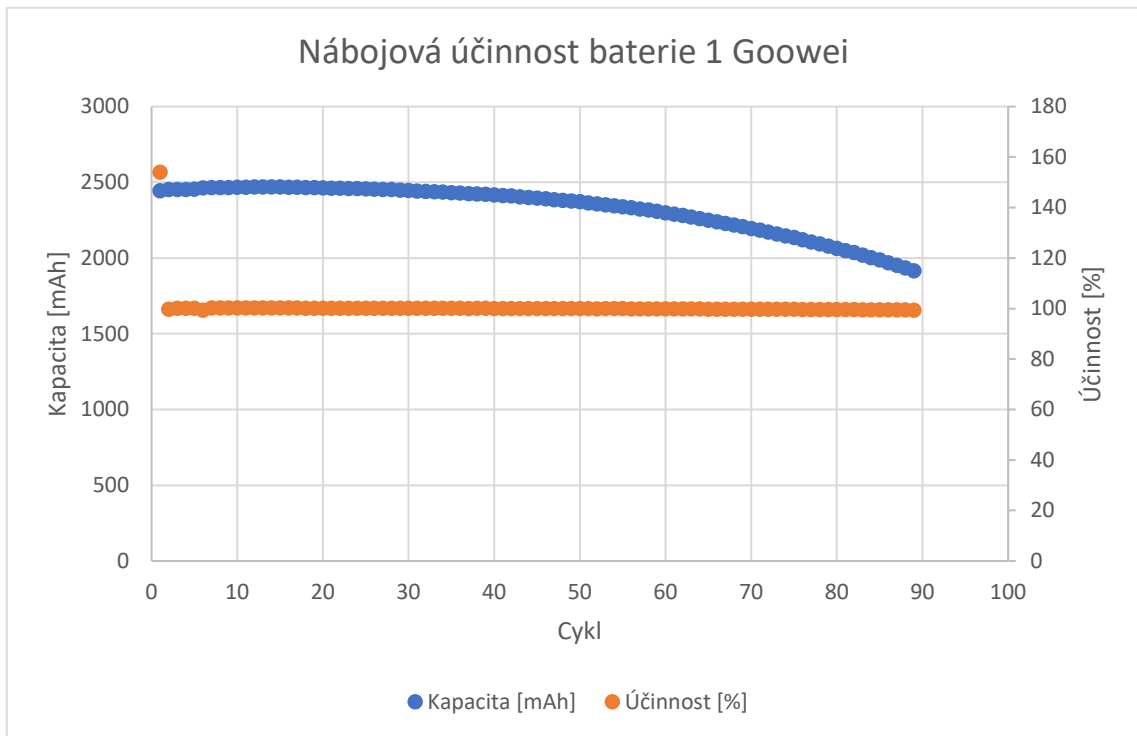
Změřené údaje - normální teplota -LiFePO ₄								
Parametr	Hodnota - sada 1				Hodnota - sada 2			
	200 Cyklů	1C	2C	3C	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	3276,90	3172,19	3190,03	3196,25	3458,31	3416,16	3429,58	3429,91
Kapacita na konci měření [mAh]	3197,21	3189,53	3201,38	3194,05	3406,89	3430,85	3427,62	3424,40
Ztráta kapacity [mAh]	79,69	-17,34	-11,35	2,20	51,42	-14,69	1,97	5,51
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	2,43	-0,55	-0,36	0,07	1,49	-0,43	0,06	0,16
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	0,70	3,87	3,33	3,14	-4,80	-3,52	-3,93	-3,94
Teplota na začátku měření [°C]	28,60	29,91	40,09	49,44	26,45	30,13	35,46	41,84
Teplota na konci měření [°C]	24,14	31,18	39,92	49,23	26,32	29,86	35,13	40,91
Minimální teplota [°C]	23,23	29,91	39,71	49,11	25,49	29,86	35,13	40,80
Maximální teplota [°C]	28,60	31,60	40,54	49,74	28,72	30,38	36,54	41,84
Teplotní rozdíl [°C]	5,38	1,69	0,83	0,63	3,23	0,51	1,41	1,04

Měření za snížené teploty

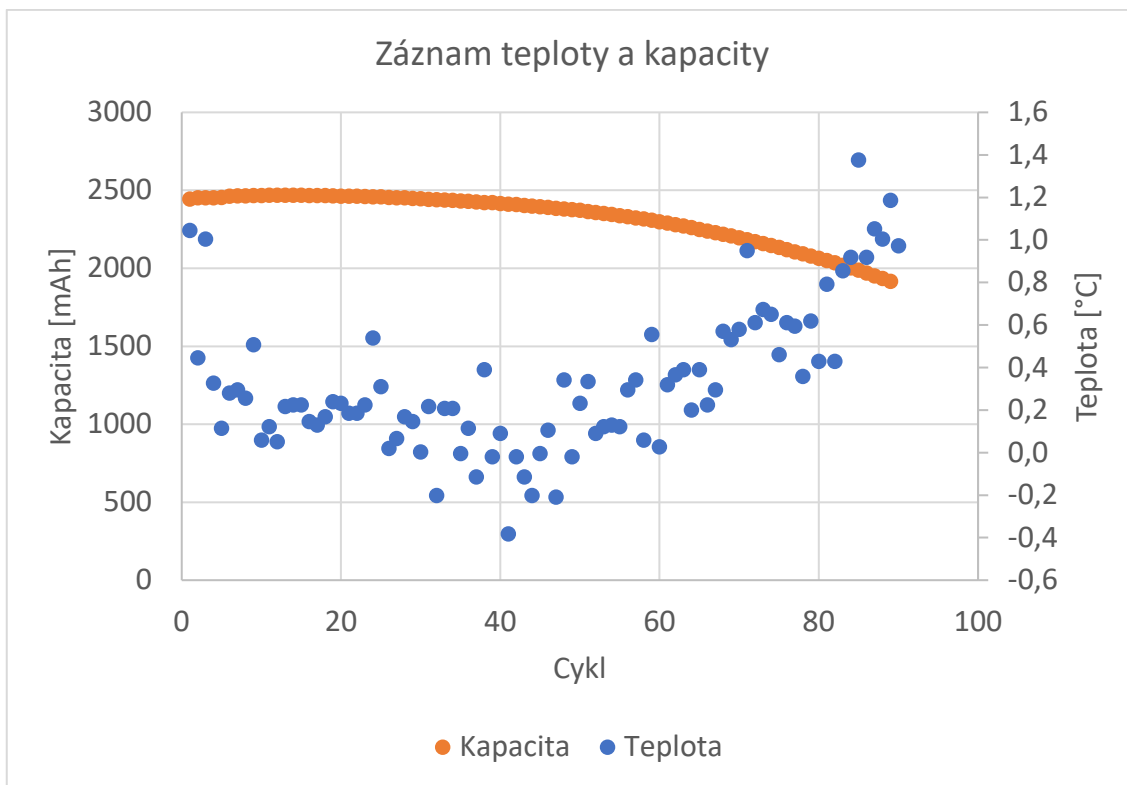
Měření za snížené teploty probíhalo podobně, jako měření za pokojové teploty. Všechny nastavovací údaje jsou stejné jako u pokojové teploty.

Goowei baterie

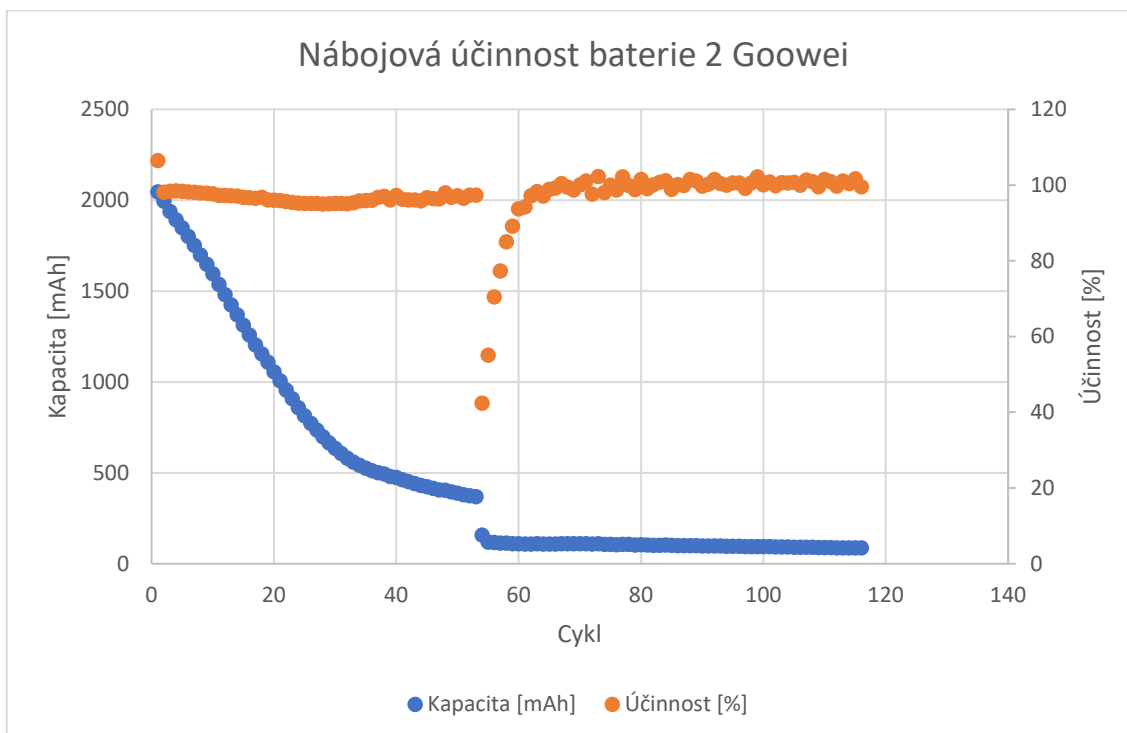
Na Graf 4.36 je vidět, jak baterie ztrácela při nízkých teplotách kapacitu. Baterie vydržela cyklovat celkem 90 cyklů. Po těchto cyklech se stala nepoužitelnou pro další měření.



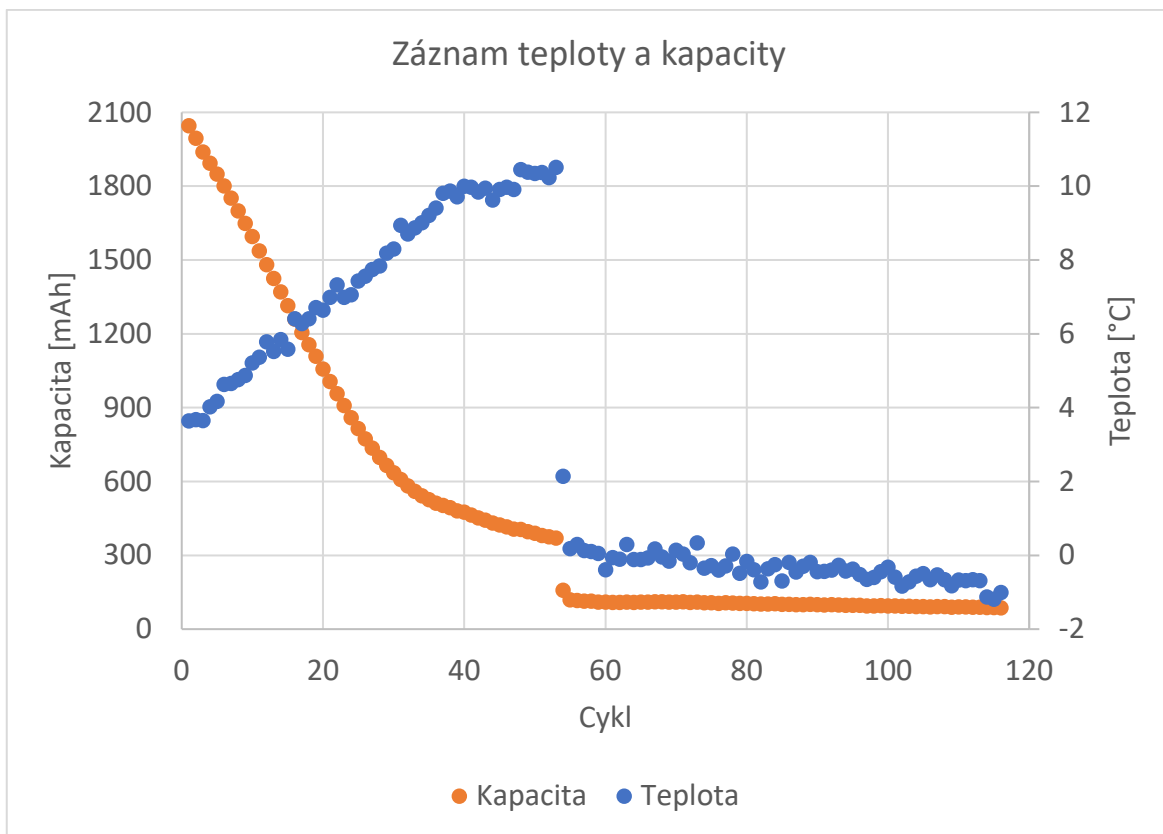
Graf 4.35 Nábojová účinnost baterie 1 Goowei za snížené teploty



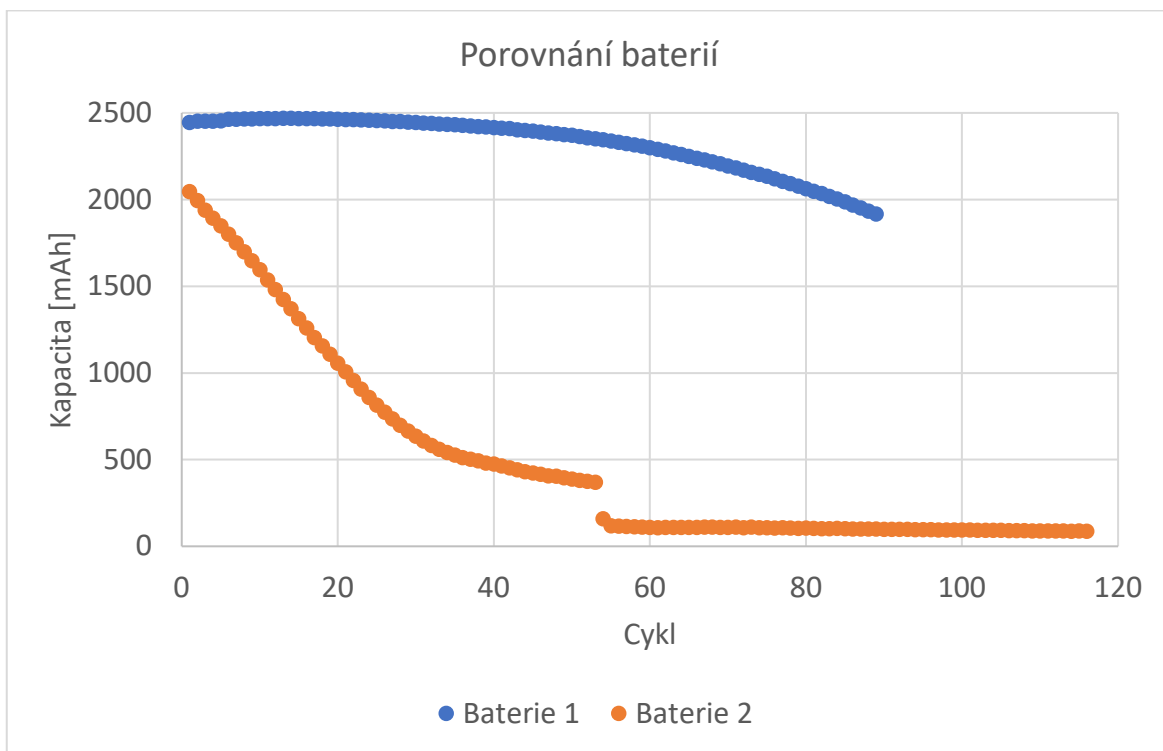
Graf 4.36 Záznam teploty a kapacity baterie 1 Goowei za snížené teploty



Graf 4.37 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za snížené teploty

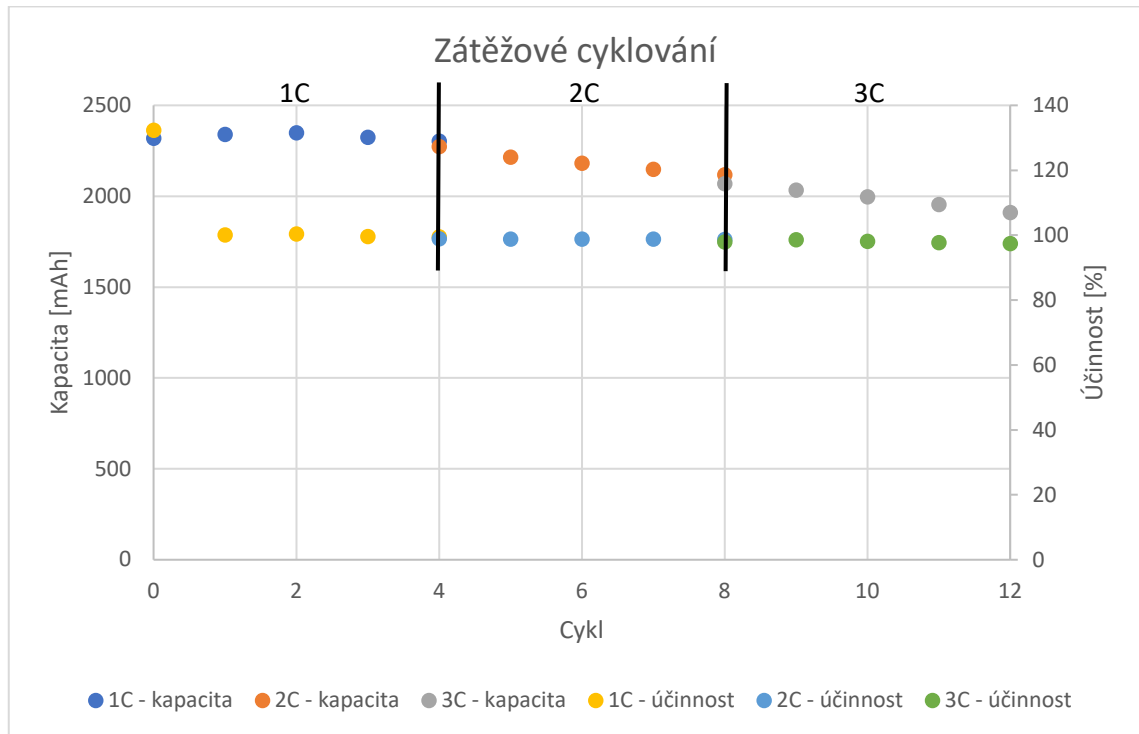


Graf 4.38 Záznam teploty a kapacity baterie 2 Gooweí za snížené teploty



Graf 4.39 Porovnání baterií Gooweí za snížené teploty

Na Graf 4.38 je patrné, že baterie 2 od společnosti Goowei vydržela cyklovat 52 cyklů. Porovnání ztrát kapacity obou baterií je vyobrazeno na Graf 4.39, kdy je patrné, že druhá baterie se zničila dříve než ta první.



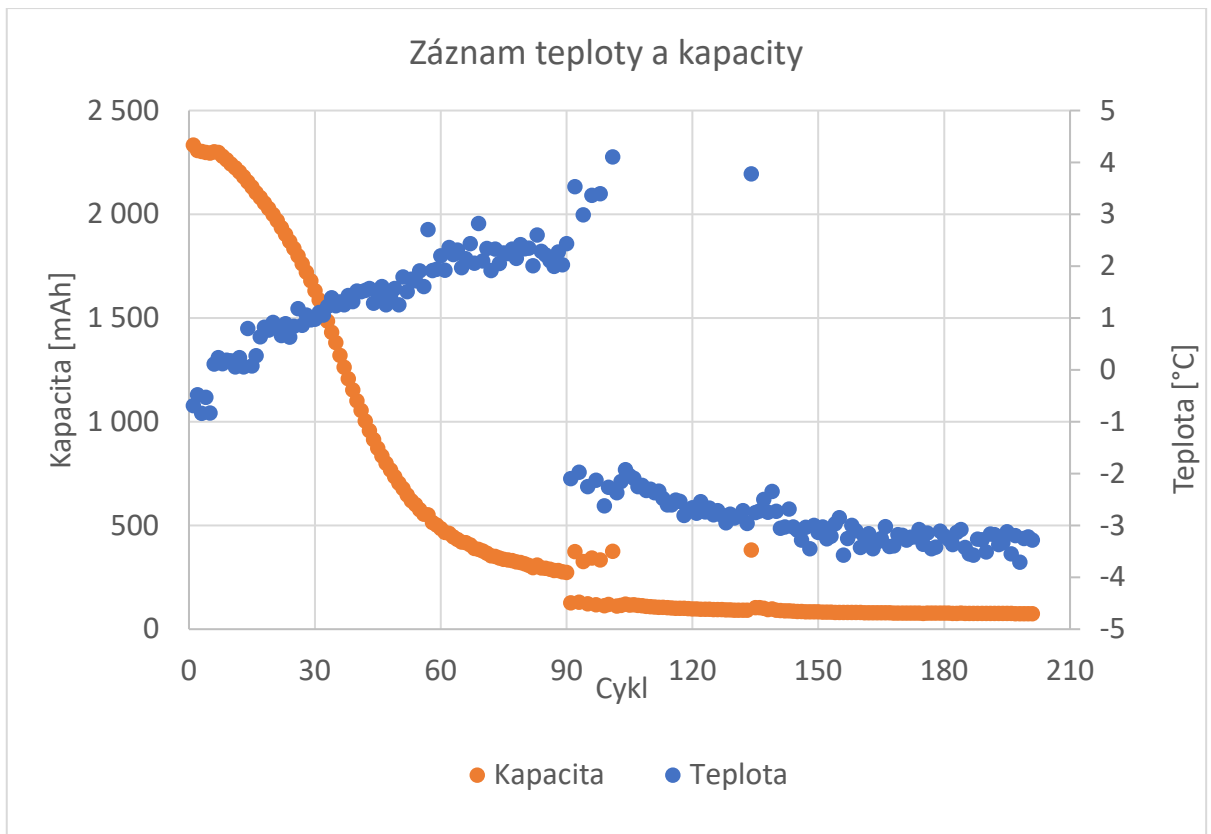
Graf 4.40 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei za snížené teploty

Než baterie 2 byla vystavena cyklování 200 cyklů, tak na ni bylo provedeno zátěžové testování. Toto testování je vyobrazeno na Graf 4.40.

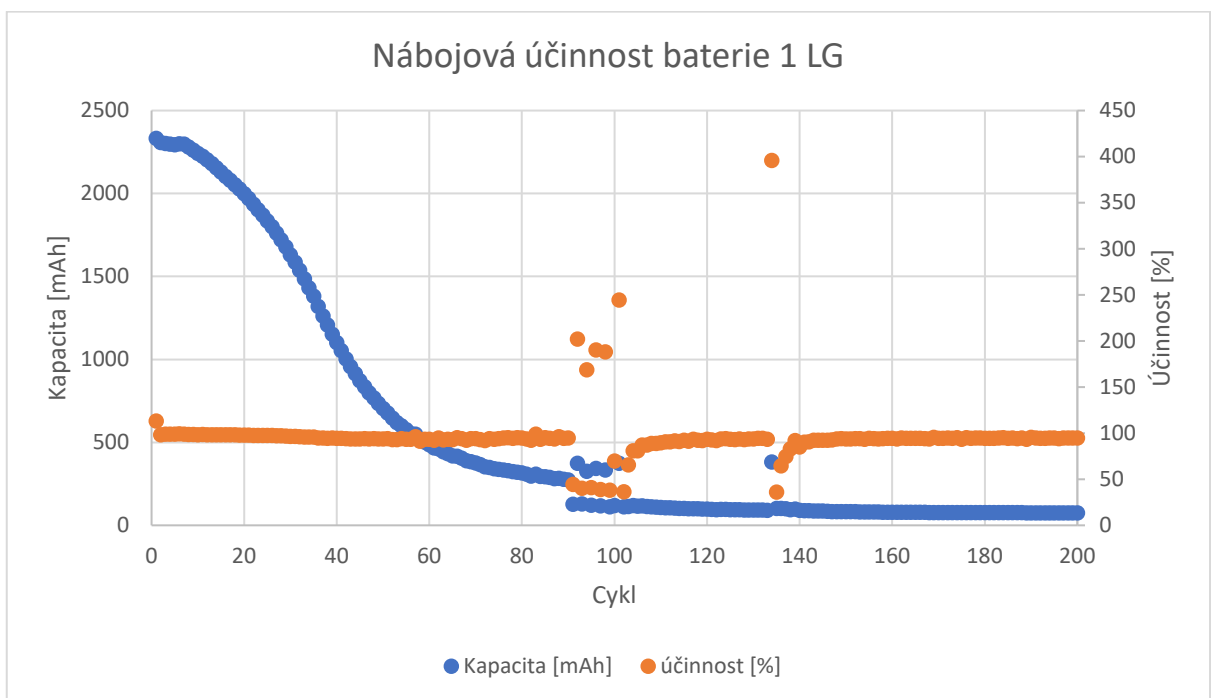
Tabulka 4.9 Porovnání naměřených hodnot za snížené teploty u baterií Goowei.

Změřené údaje - snížená teplota					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2444,35	2045,73	2318,31	2272,60	2068,52
Kapacita na konci měření [mAh]	1916,09	374,92	2302,06	2118,21	1910,44
Ztráta kapacity [mAh]	528,26	1670,81	16,25	154,39	158,08
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	21,61	81,67	0,70	6,79	7,64
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	23,61	36,07	27,55	28,98	35,36
Teplota na začátku měření [°C]	1,04	3,64	11,10	25,79	35,68
Teplota na konci měření [°C]	0,97	10,23	11,33	25,87	37,52
Minimální teplota [°C]	-0,38	3,64	11,10	25,35	35,68
Maximální teplota [°C]	1,37	10,44	11,33	25,87	37,52
Teplotní rozdíl [°C]	1,76	6,80	0,24	0,52	1,84

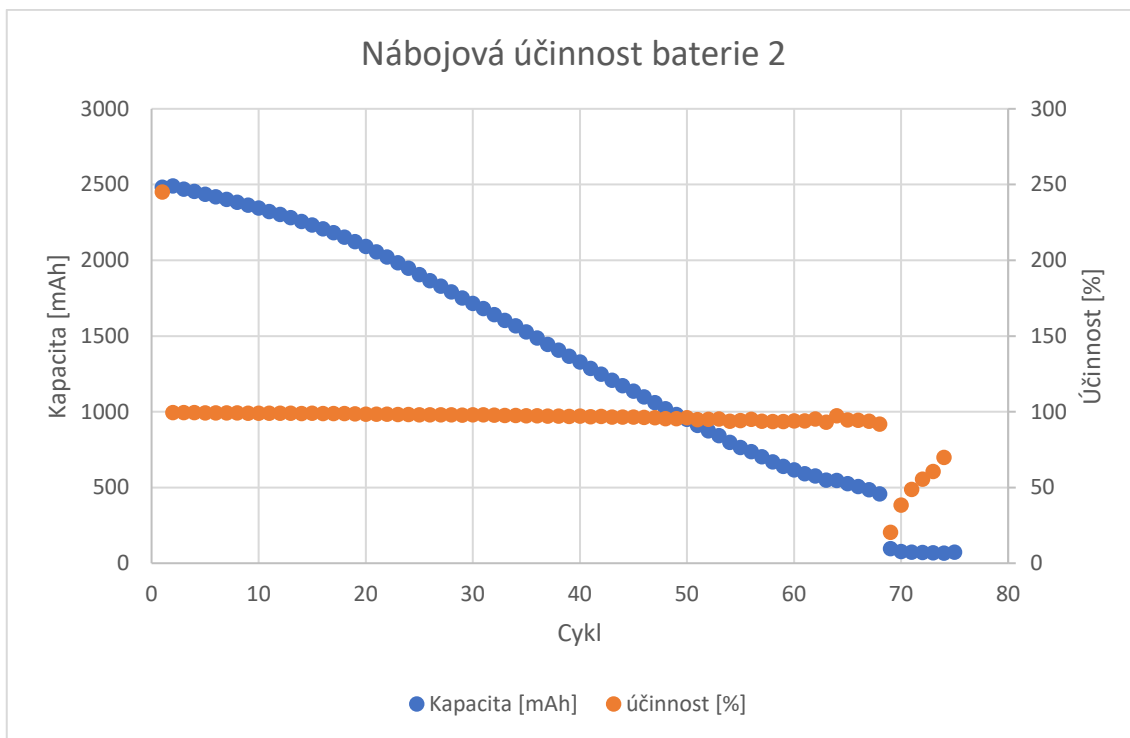
LGEB MH1 18650 baterie



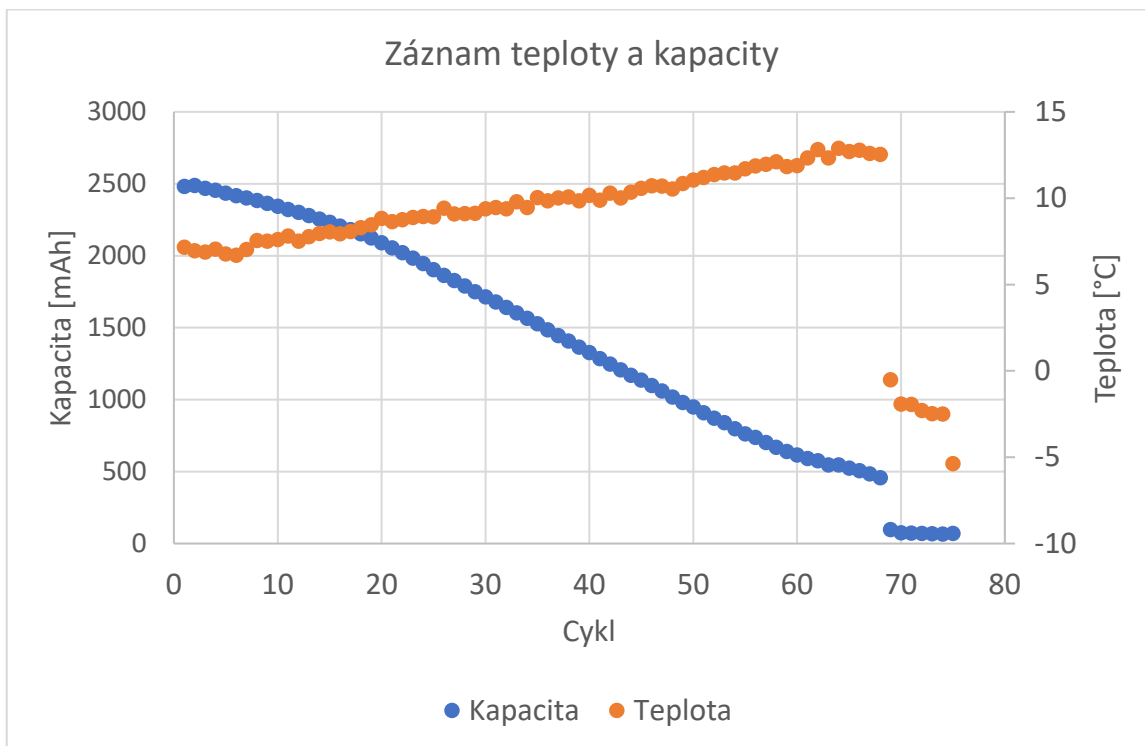
Graf 4.41 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za snížené teploty



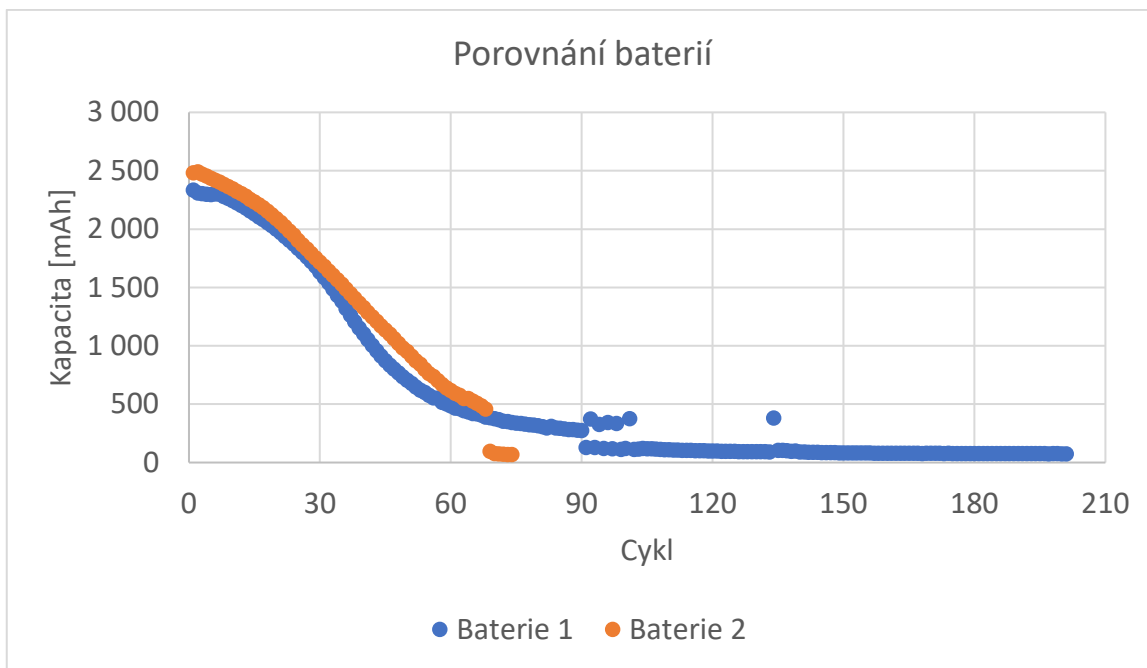
Graf 4.42 Nábojová účinnost baterie 1 LG za snížené teploty



Graf 4.43 Nábojová účinnost baterie 2 LG za snížené teploty

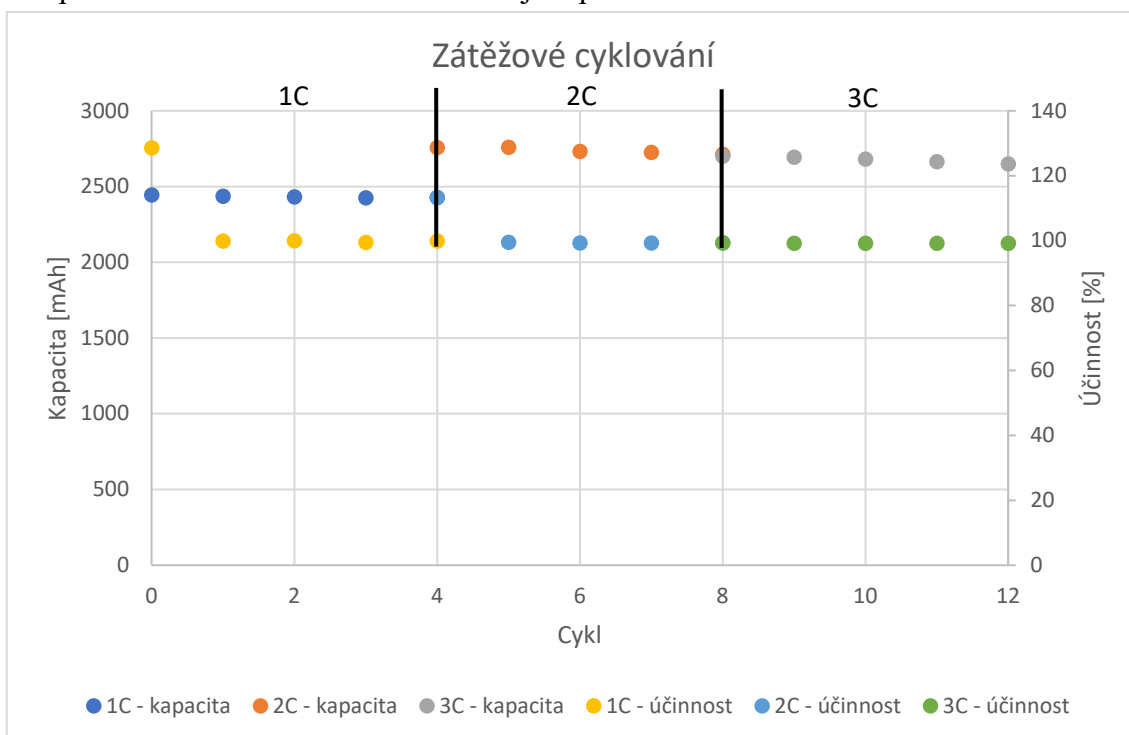


Graf 4.44 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za snížené teploty



Graf 4.45 Porovnání baterií LG za snížené teploty

Na Graf 4.44 je znázorněn pokles kapacity baterie během cyklování. Baterie vydržela cyklovat 68 cyklů než se zničila. Na Graf 4.45 je znázorněno porovnání baterií od společnosti LG. Baterie 2 ztratila svoji kapacitu dříve než baterie 1.

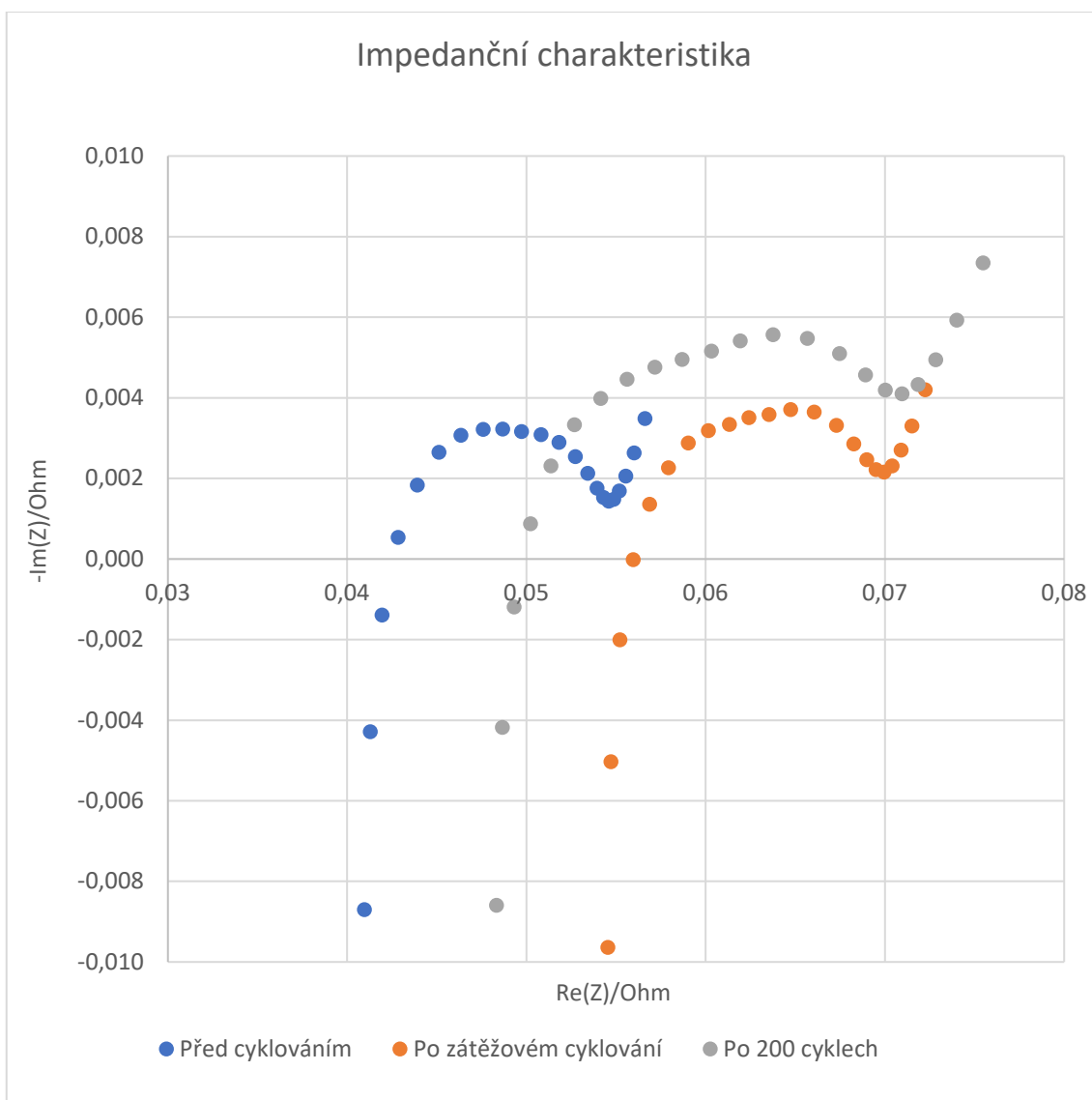


Graf 4.46 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za snížené teploty

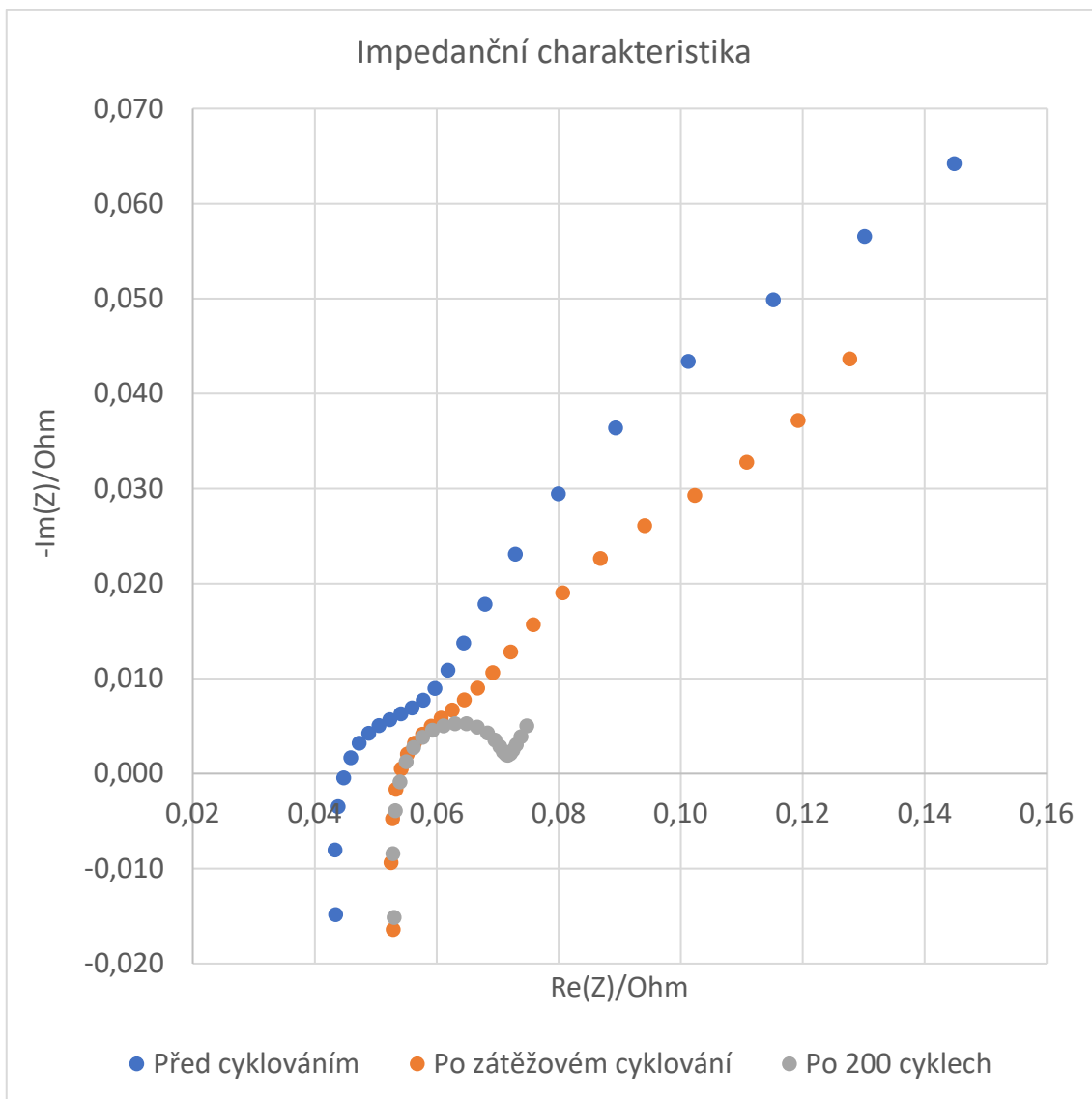
Před tím, než byla baterie 2 vystavena dlouhodobému cyklování, tak se na ni provedlo zátěžové cyklování. Toto cyklování je vyobrazeno na Graf 4.46.

Tabulka 4.10 Porovnání naměřených hodnot baterií LG za nízké teploty.

Změřené údaje - snížená teplota					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2332,60	2481,02	2444,76	2756,85	2700,81
Kapacita na konci měření [mAh]	74,54	67,04	2434,59	2713,13	2650,32
Ztráta kapacity [mAh]	2258,06	2413,98	10,17	43,72	50,49
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	96,80	97,30	0,42	1,59	1,87
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	27,11	22,47	23,60	13,85	15,60
Teplota na začátku měření [°C]	-0,69	7,16	0,85	-5,07	-5,26
Teplota na konci měření [°C]	-3,28	-2,50	0,64	-5,34	-5,27
Minimální teplota [°C]	-3,71	-5,37	0,64	-5,34	-5,42
Maximální teplota [°C]	4,11	12,89	1,03	-5,03	-5,18
Teplotní rozdíl [°C]	7,82	18,26	0,39	0,31	0,24



Obrázek 4.1 Impedanční charakteristika baterie LG v nabitém stavu



Obrázek 4.2 Impedanční charakteristika baterie LG za vybitého stavu

Obrázek 4.1 znázorňuje změnu impedance (vnitřního odporu) baterie v nabitém stavu. Obrázek 4.2 vyobrazuje vnitřní impedanci baterie ve vybitém stavu. Impedance ve vybitém stavu se zvětšuje. Vybraná data z impedanční spektrometrie jsou zaneseny v

Tabulka 4.11 a Tabulka 4.12 je výtazek dat z impedanční spektroskopie, kde se porovnávají data. Největší zvětšení impedance bylo po zátěžovém cyklování. Od zátěžového cyklování se impedance baterie jen nepatrně zvětšila.

Tabulka 4.11 Porovnání dat z impedanční spektrometrie za nabitého stavu

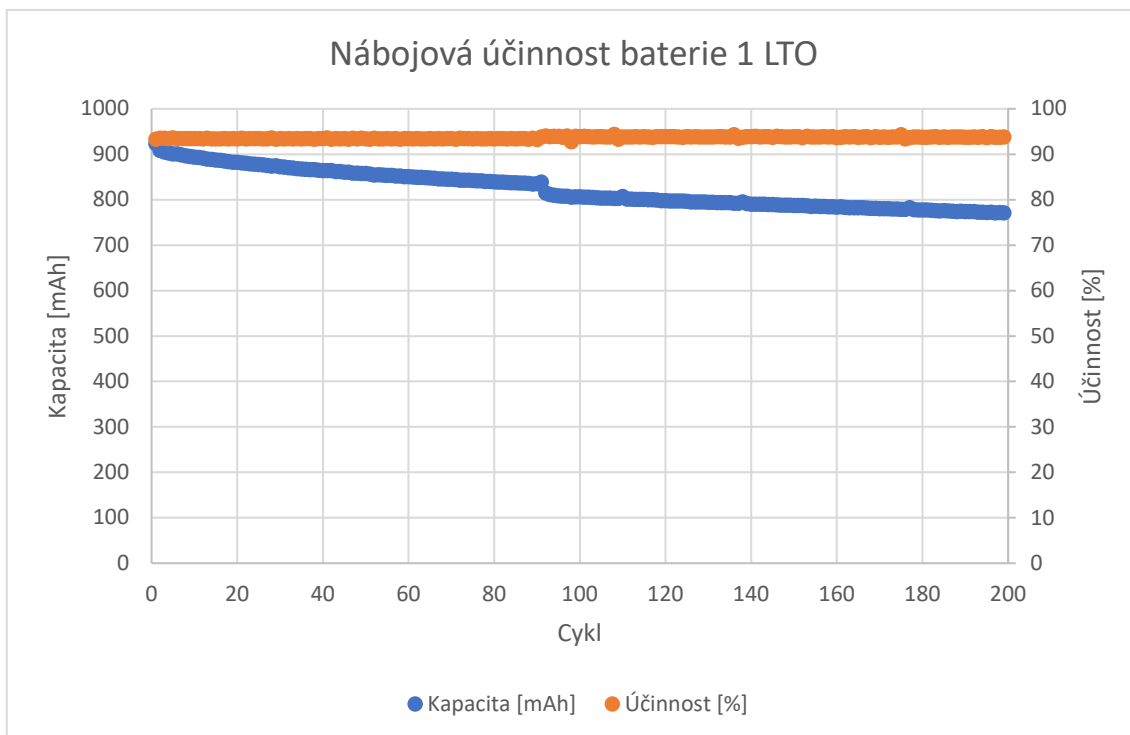
Nabitý stav					
Před cyklováním		Po zátěžovém cyklování		Po cyklování 200 cyklů	
freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm
5733,64	0,050	5733,64	0,063	5733,64	0,050
2213,54	0,042	2213,54	0,055	2213,54	0,048
853,09	0,042	853,09	0,055	853,09	0,049
328,84	0,044	328,84	0,057	328,84	0,051
126,83	0,046	126,83	0,059	126,83	0,054
48,95	0,049	48,95	0,061	48,95	0,057
18,87	0,051	18,87	0,064	18,87	0,060
7,27	0,053	7,27	0,066	7,27	0,064
2,81	0,054	2,81	0,068	2,81	0,067

Tabulka 4.12 Porovnání dat z impedanční spektrometrie za vybitého stavu

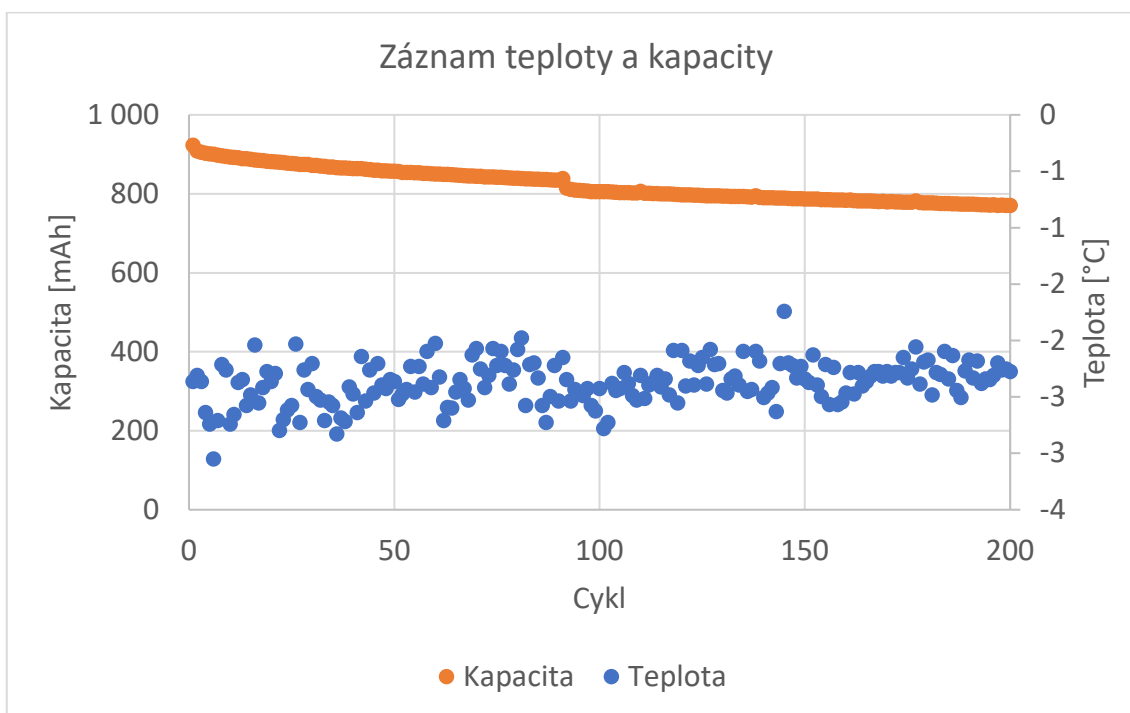
Vybitý stav					
Před cyklováním		Po zátěžovém cyklování		Po cyklování 200 cyklů	
freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm
5733,64	0,0511	5733,64	0,0605	5733,64	0,0598
2213,54	0,0441	2213,54	0,0533	2213,54	0,0535
853,09	0,0447	853,09	0,0533	853,09	0,0540
328,84	0,0474	328,84	0,0552	328,84	0,0563
126,83	0,0508	126,83	0,0578	126,83	0,0595
48,95	0,0545	48,95	0,0610	48,95	0,0632
18,87	0,0583	18,87	0,0650	18,87	0,0668
7,27	0,0628	7,27	0,0700	7,27	0,0696
2,81	0,0702	2,81	0,0774	2,81	0,0710

GWL LTO baterie

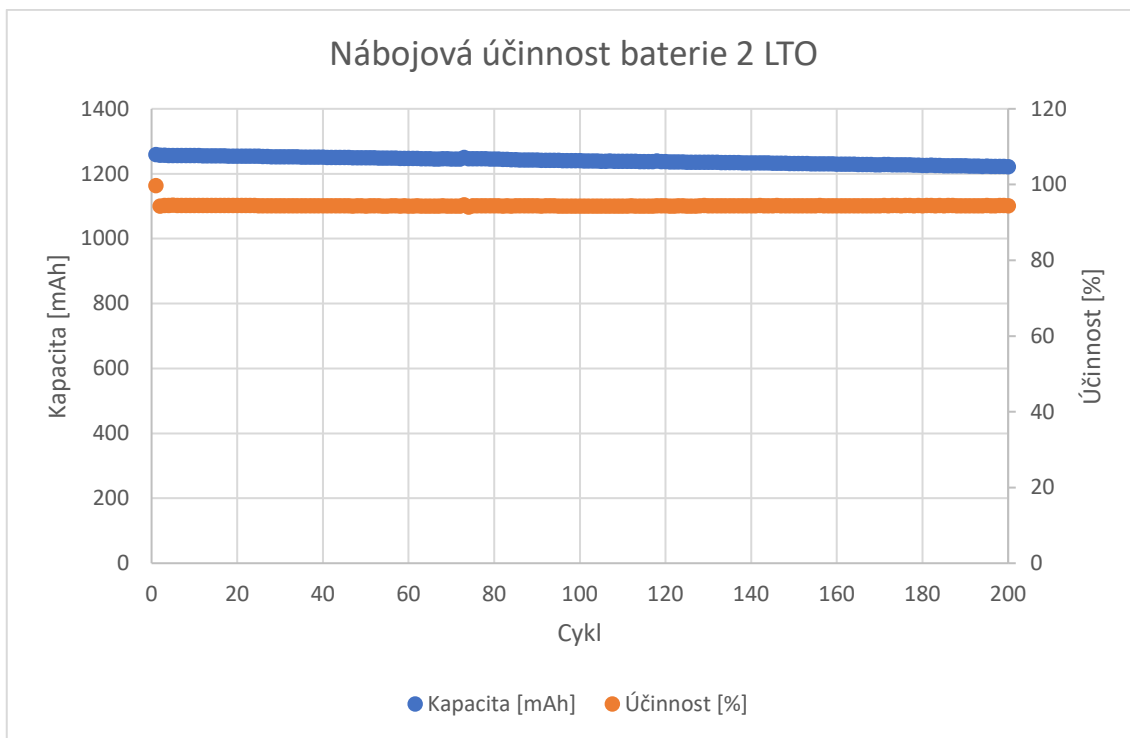
Na Graf 4.50 je znázorněn záznam kapacity a teploty za nízké teploty v klimatické komoře. Baterie LTO na začátku cyklování měla kapacitu 923 mAh a na konci měření měla kapacitu 770 mAh. Ztratila ze své kapacity celkem 152 mAh. Na Graf 4.52 je znázorněna baterie 2 její pokles kapacity a nárůst teploty. Baterie 2 má větší pokles kapacity než baterie 1.



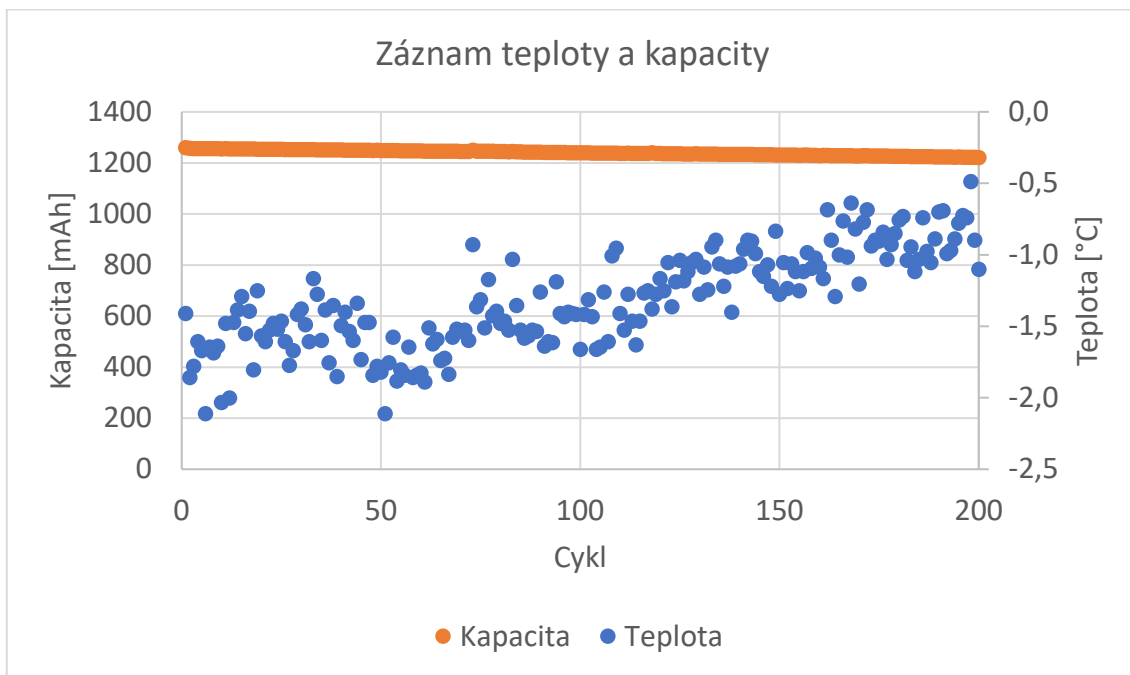
Graf 4.47 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za snížené teploty



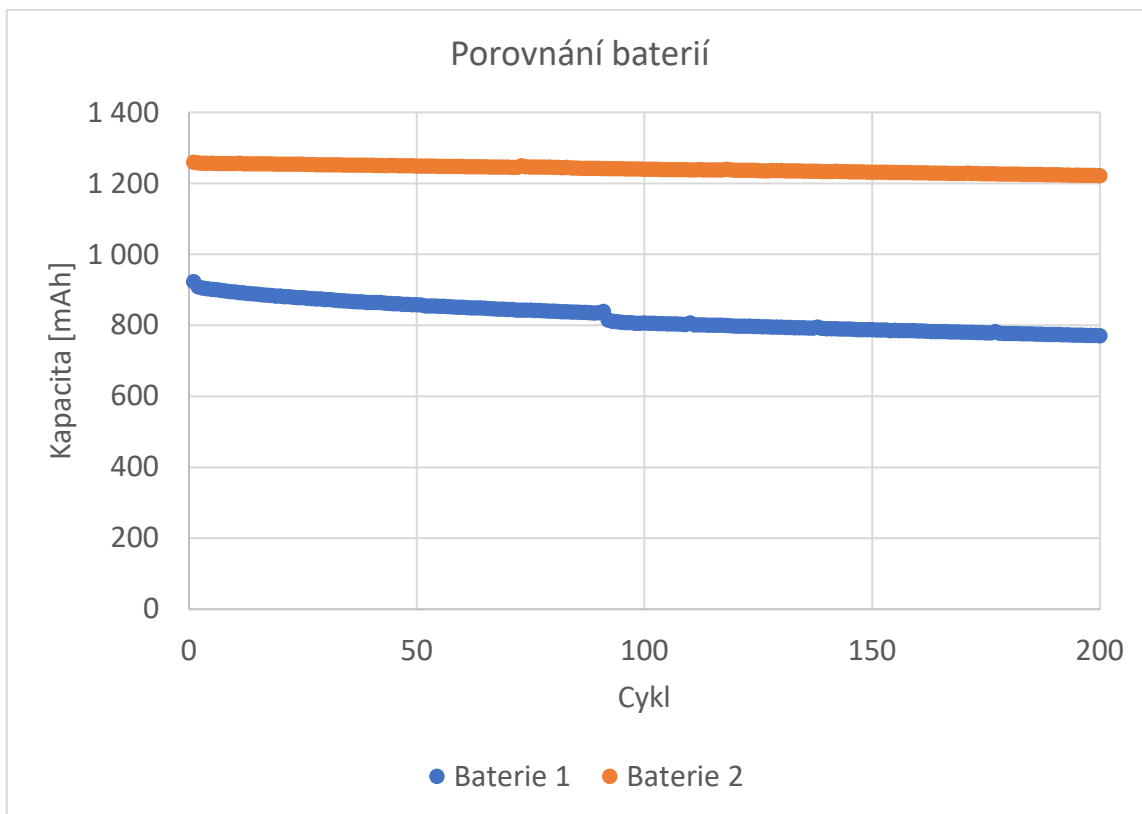
Graf 4.48 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za snížené teploty



Graf 4.49 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za snížené teploty

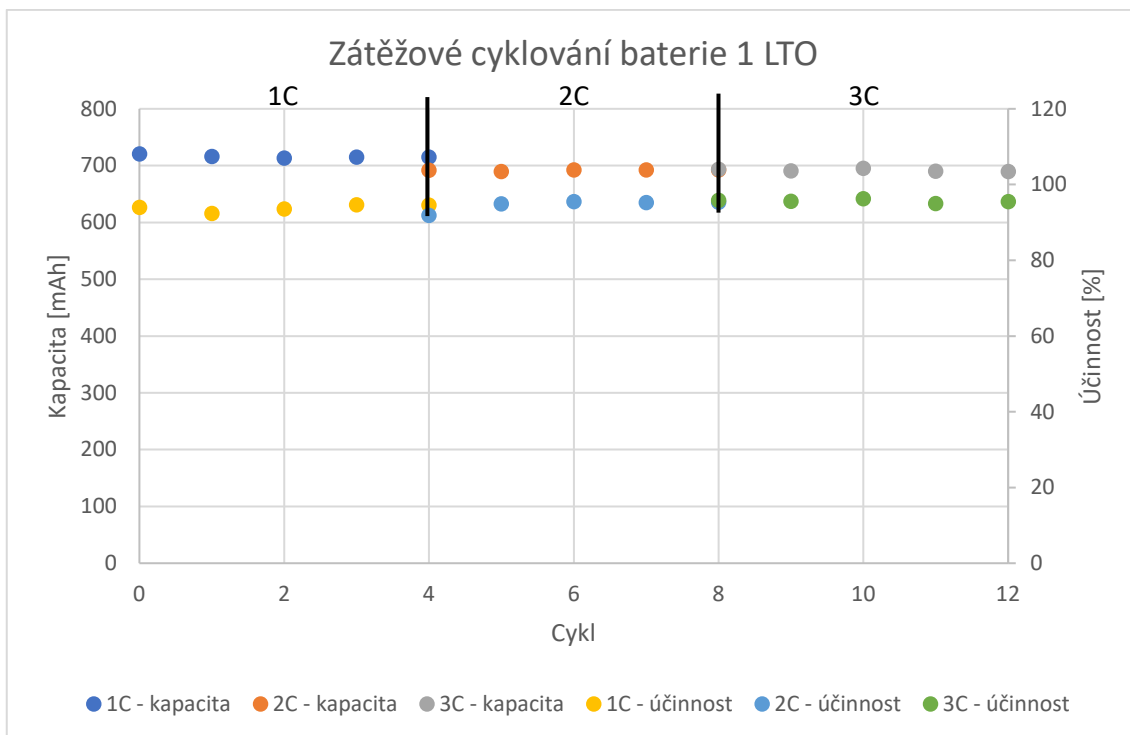


Graf 4.50 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za snížené teploty

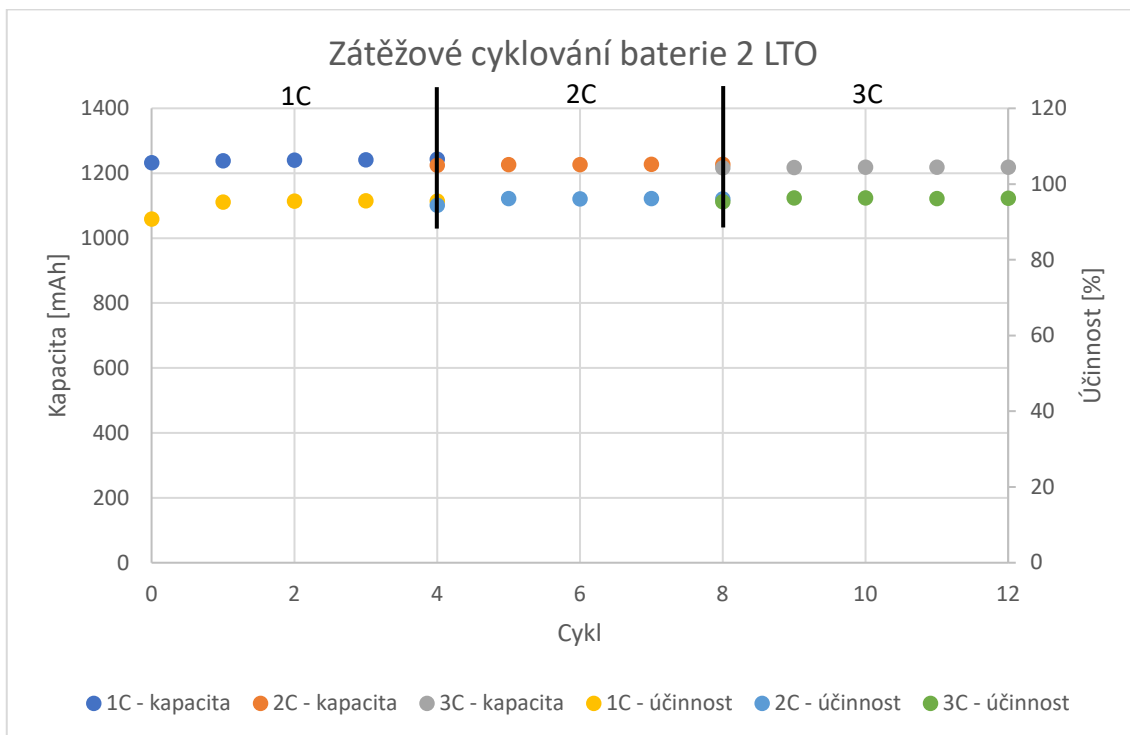


Graf 4.51 Porovnání baterií LTO za snížené teploty

Na Graf 4.53 je vidět rozdíl mezi kapacitami baterií. Obě baterie mají podobný spád ztráty kapacity.



Graf 4.52 Zátěžové cyklování baterie 1 LTO za snížené teploty



Graf 4.53 Zátěžové cyklování baterie 2 LTO za snížené teploty

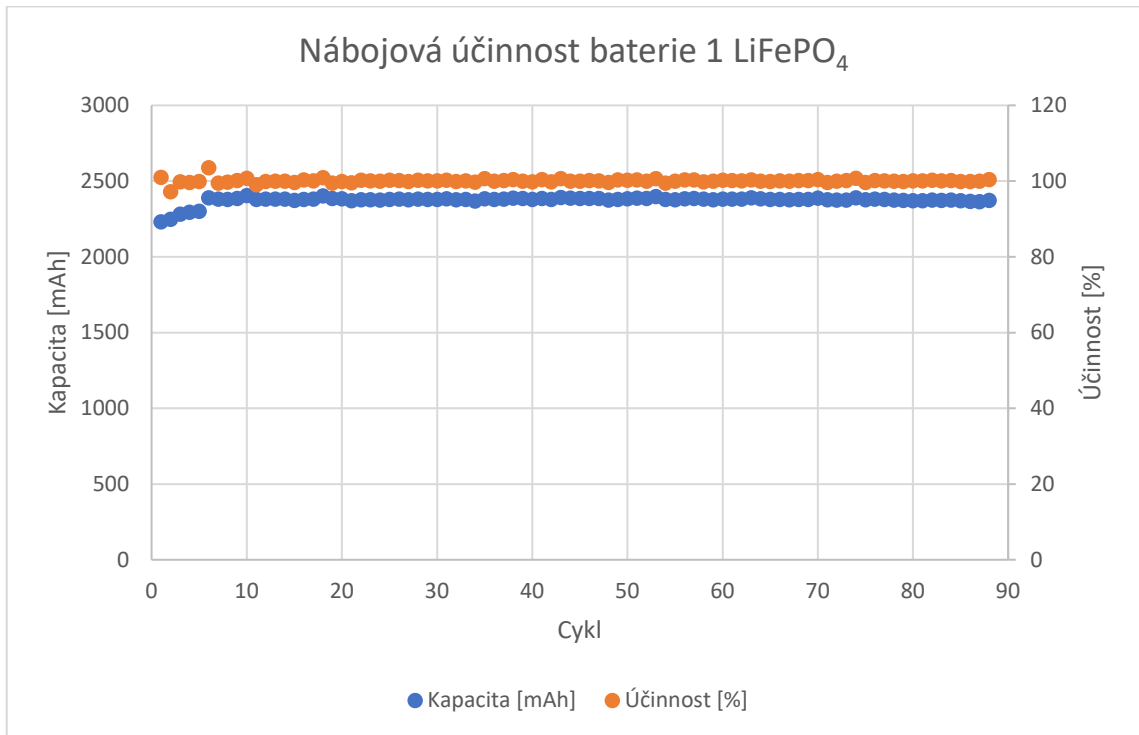
Na Graf 4.54 a Graf 4.55 je zaznamenáno zátěžové cyklování baterií LTO. Baterie 1 byla zátěžově testována po provedení 200 cyklů. Baterie 2 byla zátěžově testována hned

na začátku celého měření a po tomto zátěžovém cyklování bylo provedeno cyklování 200 cyklů.

Tabulka 4.13 Porovnání naměřených hodnot baterie LTO za nízké teploty.

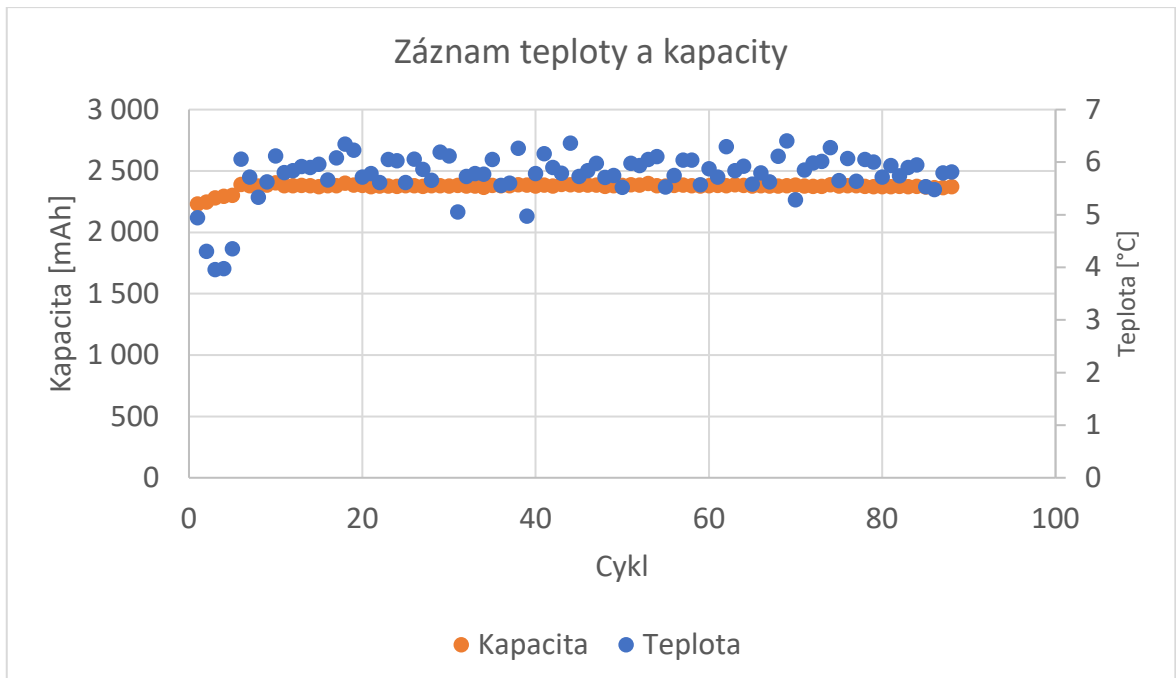
Změřené údaje - snížená teplota								
Parametr	Hodnota - baterie 1				Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	1C	2C	3C	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	923,15	720,47	691,50	693,35	1259,21	1232,14	1224,43	1216,31
Kapacita na konci měření [mAh]	770,50	714,64	692,17	689,40	1221,51	1243,71	1227,90	1219,00
Ztráta kapacity [mAh]	152,64	5,83	-0,68	3,95	37,70	-11,57	-3,47	-2,69
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	16,54	0,81	-0,10	0,57	2,99	-0,94	-0,28	-0,22
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	28,99	44,58	46,81	46,67	3,14	5,22	5,81	6,44
Teplota na začátku měření [°C]	-2,36	-0,47	3,01	6,19	-1,41	-0,27	3,79	6,47
Teplota na konci měření [°C]	-2,66	-0,71	2,64	5,68	-1,10	0,10	3,57	6,08
Minimální teplota [°C]	-5,07	-0,71	2,59	5,68	-2,11	-0,28	3,21	6,01
Maximální teplota [°C]	-1,74	-0,45	3,01	6,34	-0,49	0,24	3,79	6,47
Teplotní rozdíl [°C]	3,33	0,26	0,42	0,66	1,62	0,52	0,58	0,46

LiFePO₄ baterie

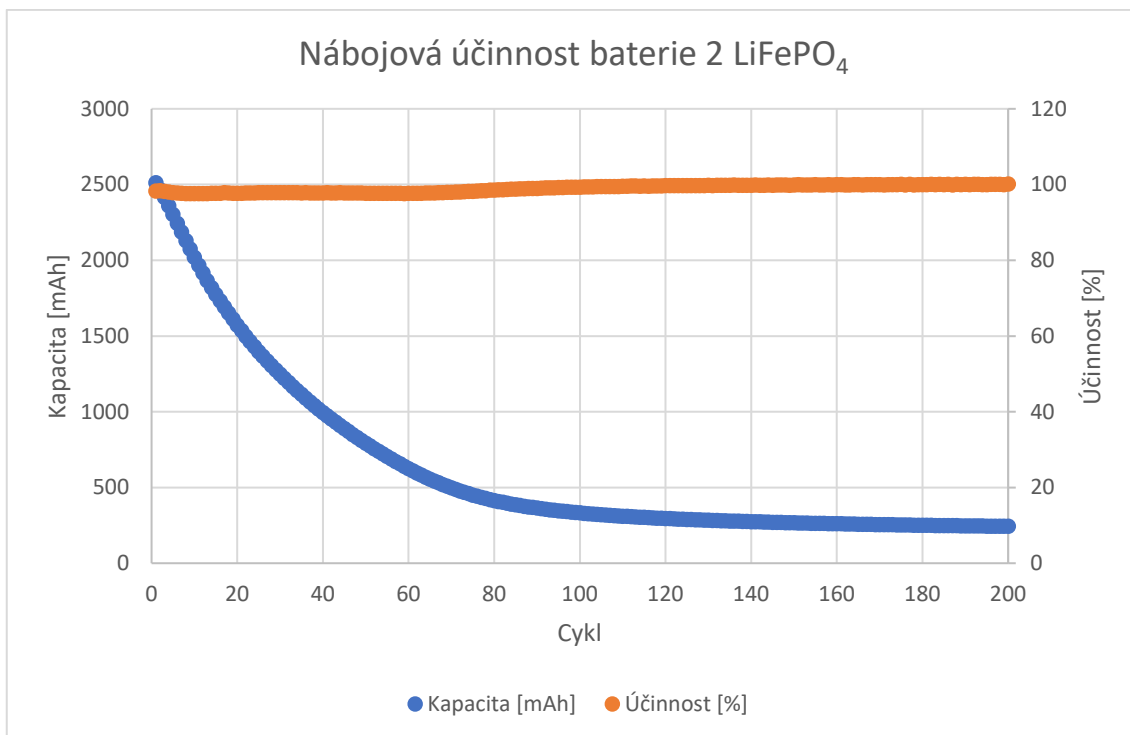


Graf 4.54 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO₄ za snížené teploty

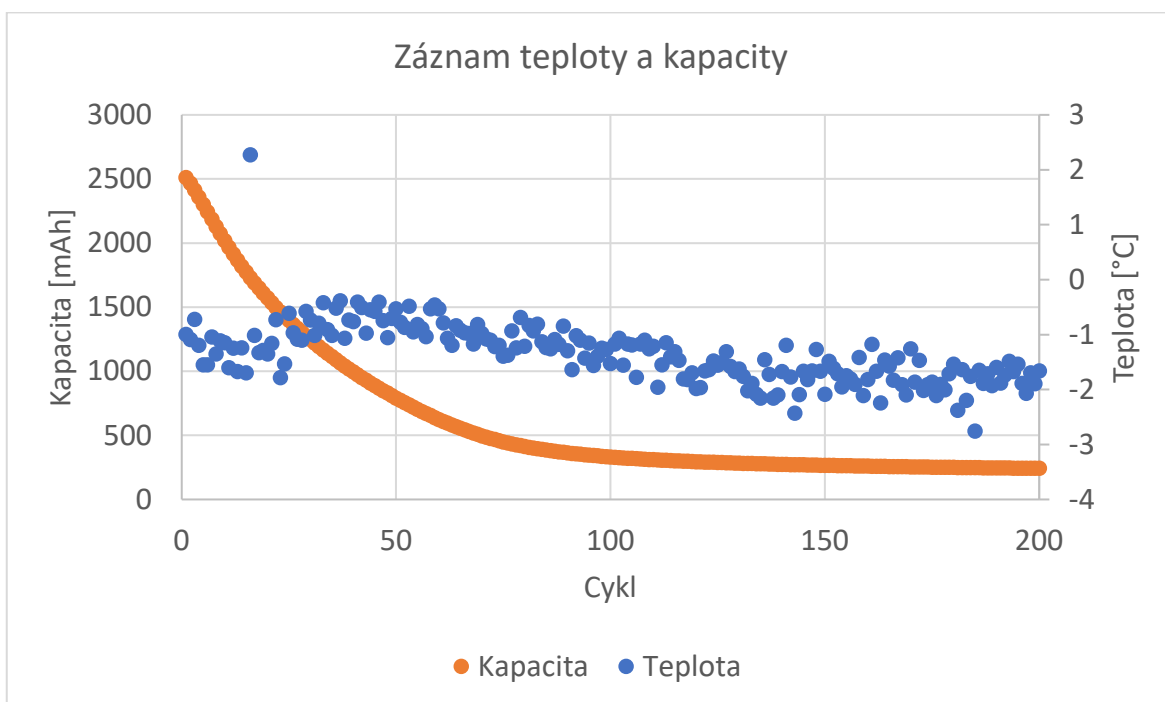
Na Graf 4.57 je znázorněno cyklování baterie 1.



Graf 4.55 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO₄ za snížené teploty

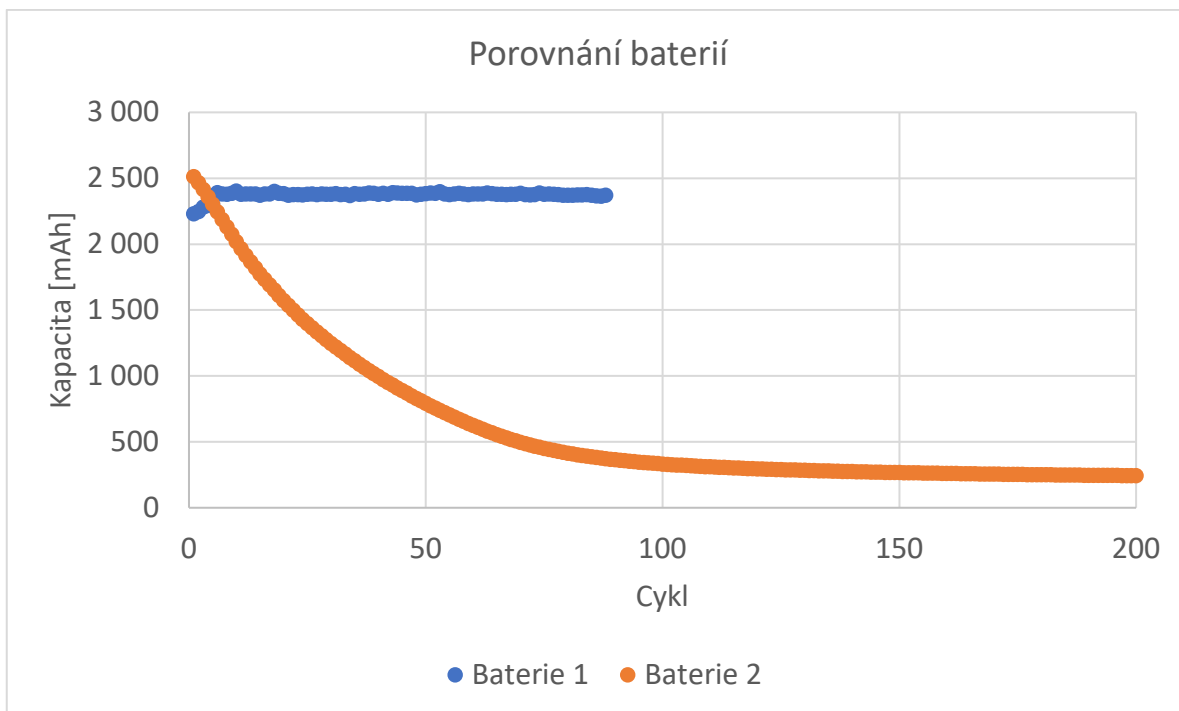


Graf 4.56 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO₄ za snížené teploty



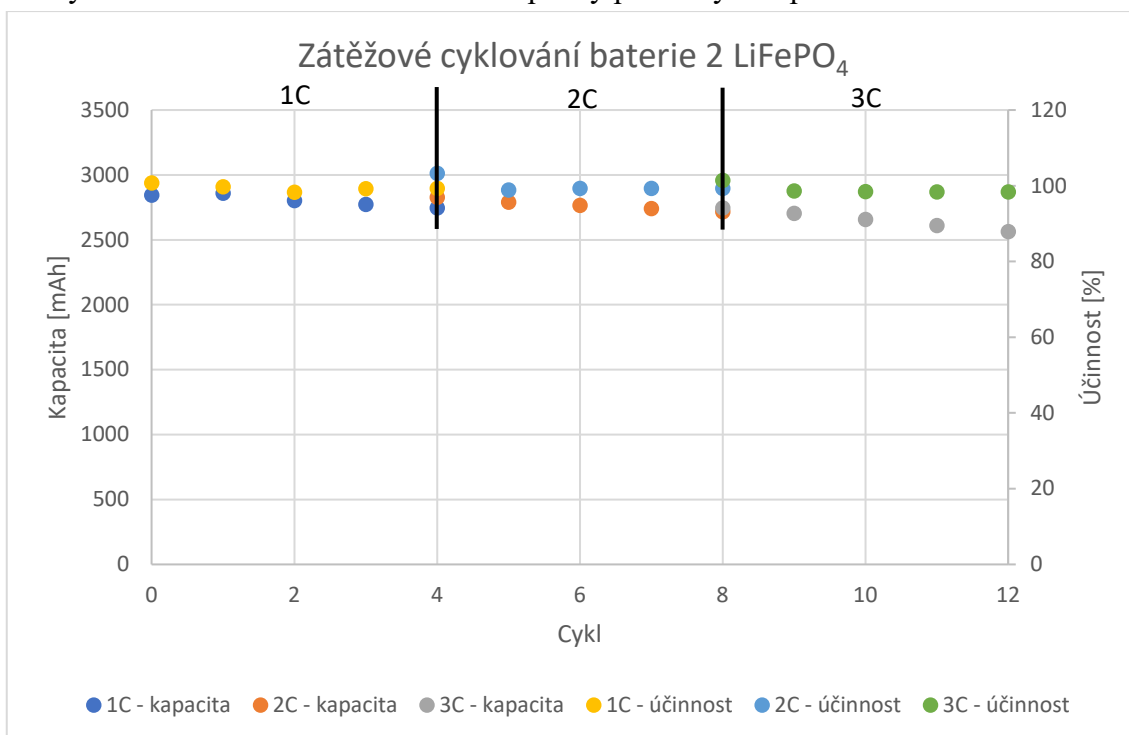
Graf 4.57 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO₄ za snížené teploty

Na Graf 4.59 je vidět razantní pokles kapacity s přibývajícím počtem cyklů.



Graf 4.58 Porovnání baterií LiFePO₄ za snížené teploty

Graf 4.60 se vyznačuje tím, že porovnává kapacity baterií. U tohoto grafu lze postřehnout, že kapacita na první baterii se snaží držet na své kapacitě. Tato baterie bohužel nezvládla provést 200 cyklů. U baterie 2 lze vidět pokles kapacity s nárůstem cyklů. Baterie ztratila většinu své kapacity při nízkých teplotách.



Graf 4.59 Zátěžové cyklování baterie 2 LiFePO₄ za snížené teploty

Před cyklováním 200 cyklů bylo na druhé baterii provedeno zátěžové cyklování. Toto cyklování je vyobrazeno na Graf 4.61.

Tabulka 4.14 Porovnání naměřených hodnot baterií typu LiFePO₄ za nízkých teplot.

Změřené údaje - snížená teplota					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2229,78	2511,06	2845,32	2827,67	2745,84
Kapacita na konci měření [mAh]	2371,51	243,04	2745,88	2715,14	2563,65
Ztráta kapacity [mAh]	-141,73	2268,02	99,45	112,53	182,19
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	-6,36	90,32	3,50	3,98	6,64
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	32,43	23,91	13,78	14,31	16,79
Teplota na začátku měření [°C]	4,95	-1,00	6,51	10,64	14,36
Teplota na konci měření [°C]	-4,79	-1,66	5,55	9,84	13,28
Minimální teplota [°C]	-4,79	-2,75	5,55	9,80	13,28
Maximální teplota [°C]	6,40	2,27	6,77	10,64	14,36
Teplotní rozdíl [°C]	11,19	5,03	1,21	0,84	1,08

Zhodnocení měření

Baterie za pokojové teploty vydržely cyklovat 200 cyklů s zatížením 0,5C. Některé baterie nedokázaly cyklovat 3C za pokojové teploty z důvodu, že byla překročena bezpečnostní teplota. Tato teplota byla nastavena na 65 °C.

Baterie Goowei za pokojové teploty

První baterie Goowei měla menší kapacitu, než udává výrobce. Tato kapacita byla naměřena a její hodnota byla 2949 mAh. Na konci cyklování 200 cyklů baterie měla kapacitu 2808 mAh. Baterie ztratila 5 % své kapacity při cyklování. Druhá baterie Goowei, měla na počátku měření kapacitu 2796 mAh a na konci cyklování 200 cyklů měla kapacitu 2704 mAh. Obě tyto baterie od společnosti Goowei měly na začátku měření menší kapacitu, než udává výrobce. Obě baterie od společnosti Goowei nedokázaly cyklovat se zatížením 3C. Toto zatížení se blížilo hodnotě 10 A, které by měly tyto baterie zvládnout. Podle výrobce měly tyto baterie mít kapacitu 3200 mAh, maximální vybíjecí proud 10 A a provozní vybíjecí teploty by neměly přesáhnout 60 °C. Tyto hodnoty nebyly naměřeny a teplota byla překročena.

Baterie LGEB MH1 18650 za pokojové teploty

První baterie od společnosti LG za pokojové teploty měla kapacitu 2872 mAh a na konci cyklování 200 cyklů měla kapacitu 2727 mAh. Druhá baterie od společnosti LG měla na začátku měření kapacitu 3089 mAh a na konci cyklování 200 cyklů měla kapacitu 2903 mAh. Druhá baterie bohužel nevydržela zátěžové cyklování 3C, z toho důvodu, že byla překročena bezpečnostní teplota. První baterie vydržela vybíjení proudem, který se blížil 10 A a to je maximální vybíjecí proud. Provozní teplota je maximálně 60 °C. Výrobce udává kapacitu 3200 mAh.

Baterie LTO za pokojové teploty

Baterie LTO od prodejce GWL měla za pokojové teploty kapacitu 1136 mAh a na konci měření měla kapacitu 960 mAh. Tato první baterie nebyla cyklována zátěžovým cyklováním. Druhá baterie LTO měla na začátku měření kapacitu 1365 mAh. Tato kapacita je vyšší, než udává výrobce a to 5 %. Výrobce udává kapacitu 1300 mAh. Tato baterie dokázala cyklovat se zatížením 3C. Maximální vybíjecí proud nebyl u této baterie dosažen z toho důvodu, že maximální vybíjecí proud je 15 A.

Baterie LiFePO₄ za pokojové teploty

Poslední baterie, která byla testována za pokojové teploty je baterie s označením LiFePO₄. Tyto baterie zvládly cyklování se zatížením 3C. První baterie měla menší kapacitu než udává výrobce a to 3276 mAh. Na konci cyklování 200 cyklů měla kapacitu 3197 mAh. Výrobce udává kapacitu 3300 mAh. Druhá baterie měla vyšší kapacitu a to 3458 mAh. Tato vyšší kapacita byla udržena po dobu celého měření. Na konci cyklování 200 cyklů měla baterie kapacitu 3406 mAh.

Baterie byly měřeny také za snížené teploty. Při této teplotě baterie rychle ztrácely kapacitu. Nabíjení baterií bylo prováděno pod teplotou 0 °C. Pod touto teplotou výrobce nedoporučuje nabíjení.

Baterie Goowei za snížené teploty

První baterie Goowei se zničila při cyklování 200 cyklů, ke zničení došlo při 90. cyklu. Druhá baterie se zničila při 52. cyklu. První baterie nebylo možno zátěžově proměřit, protože se začalo měření 200 cyklů. Druhá baterie byla proměřena zátěžovým cyklováním a pak 200 cyklů. První baterie měla na začátku cyklování kapacitu 2444 mAh a na konci měření měla kapacitu 1916 mAh. Druhá baterie měla na začátku měření kapacitu 2045 mAh a na konci 374 mAh. Při porovnání kapacit s kapacitou udávanou výrobcem jde zjistit, že baterie měly mnohem menší kapacitu, než výrobce udává.

Baterie LGEB MH1 18650 za snížené teploty

Baterie od společnosti LG byly také zničeny vlivem nízkých teplot. První baterie se zničila při 90. cyklu. Druhá baterie se zničila při 68. cyklu. Stejně jako u předchozího typu baterie nešlo u první baterie proměřit zátěžové cyklování. Na druhé baterii bylo provedeno nejdříve zátěžové cyklování a následně 200 cyklů. První baterie měla na začátku kapacitu 2332 mAh a na konci měla kapacitu 74 mAh. Druhá baterie měla na začátku měření kapacitu 2481 mAh a na konci měla kapacitu 67 mAh.

Baterie LiFePO₄ za snížené teploty

Stejně jako předchozí baterie, tak ani baterie LiFePO₄ nedokázala vydržet cyklování za nízkých teplot. První baterie měla na začátku měření kapacitu 2229 mAh a na konci 2371 mAh. Tato baterie se zničila při 87. cyklu. Druhá baterie měla na začátku měření kapacitu 2511 mAh a na konci měření měla kapacitu 243 mAh.

Baterie LTO za snížené teploty

Poslední baterie, která byla testována za snížené teploty byla baterie LTO. Tato baterie vydržela cyklování 200 cykly a zátěžové cyklování. Baterie má minimální teplotu pro nabíjení stanovenou na -15 °C. Z naměřených výsledků jde poznat, že baterie mají horší parametry za snížené teploty, kdy dochází k degračním mechanismům.

5. ZÁVĚR

Zadáním diplomové práce bylo proměřeno konvenčních baterií za pokojové a za snížené teploty. Při měření těchto baterií došlo k poškození některých baterií. Celkem byly dodány dvě sady baterií. Přitom ta první sada baterií vykazovala horší výsledky. Některé baterie, které se proměřovaly, měly větší kapacity, než udával výrobce. Lze tím říci, že ne všechny baterie jsou stejné. Záleží na to na mnoha faktorech výroby. Při měření za pokojové teploty u první sady se pohybovala ztráta kapacity do 6 % od první naměřené hodnoty. Nejhorší pokles kapacity za pokojové teploty měla baterie typu LTO. Tato baterie měla pokles kapacity 15%. Při měření druhé sady se pokles kapacity pohyboval do 3,5 %. Některé baterie z této sady vykazovaly při prvním měření vyšší kapacity, než udává výrobce. Jednalo se o baterie typu LTO a LiFePO_4 . Při měření se baterie zahřívaly, ale to bylo způsobeno změnou vnitřního odporu baterií.

Při měření za nízkých teplot docházelo ke zničení baterií, a to z toho důvodu, že baterie byly nabíjeny pod $0\text{ }^\circ\text{C}$. Výrobci baterií nedoporučují nabíjení těchto baterií pod $0\text{ }^\circ\text{C}$ z toho důvodu, že dochází k nevratným změnám uvnitř baterie. Baterie, které, nezvládly provoz pod teplotou $0\text{ }^\circ\text{C}$, jsou baterie od společnosti Goowei, které ztratily kapacitu během první poloviny měření. Další baterie, které nevydržely provoz pod $0\text{ }^\circ\text{C}$, jsou baterie od společnosti LG. Tyto baterie dosahovaly životnosti do 100 cyklů. Baterie typu LiFePO_4 se také zničily při cyklování. U těchto zmíněných baterií výrobce nedoporučuje nabíjení pod $0\text{ }^\circ\text{C}$. Jediný typ baterie, který vydržel cyklování při teplotě $-5\text{ }^\circ\text{C}$ je LTO. U tohoto typu lze nabíjet baterii do $-15\text{ }^\circ\text{C}$. Důvodem, proč baterie nevydržely cyklování při nízkých teplotách, je to, že uvnitř baterie vznikaly nevratné chemické procesy, jako je pokovování anody, růst vrstvy SEI.

Baterie, které byly proměřovány, se nejlépe hodí pro aplikace, kdy nejsou vystaveny teplotám pod $0\text{ }^\circ\text{C}$. Přesněji by se neměly tyto baterie nabíjet pod $0\text{ }^\circ\text{C}$. Baterie typu LTO lze provozovat za nízkých teplot, ale je zde problém v kapacitě baterie. Kapacita baterie je oproti ostatním bateriím menší a je nutno tedy použít více těchto baterií. Baterie Goowei a LG lze používat v přenositelných zařízeních díky své hmotnosti. Baterie typu LiFePO_4 jsou díky svému chemickému složení těžší než ostatní baterie, a proto je vhodné je využívat ve stacionárních aplikacích.

Vliv nízkých teplot se ukázal být velkým problémem pro životnost baterií než u zvýšených teplot. Výrobci udávají ve svých katalogových listech rozmezí teplot. Toto rozmezí se ještě dělí na pracovní teploty, kde baterie se vybíjí a na teploty ve kterých se baterie nabíjí. Dále výrobci specifikují teplotu skladování. Teploty na nabíjení bývají od $0\text{ }^\circ\text{C}$ do $60\text{ }^\circ\text{C}$. Pracovní teploty baterií bývají podle katalogových listů od $-20\text{ }^\circ\text{C}$ do $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Bylo by vhodné důkladně proměřit baterie při nízkých teplotách, a to z toho důvodu, že degradační vlivy jsou nejvíce zmapovány za vysokých a normálních teplot. Degradační vlivy za nízkých teplot nikdo řádně 15 let neřešil a teprve nedávno se začaly

objevovat první články s degradačními vlivy za nízkých teplot a články, které se objevují nepopisují tuto problematiku podrobně. Bohužel tyto degradační vlivy nejsou řádně zmapovány. Dalším pokračováním této diplomové práce by mělo být řádné zmapování těchto vlivů za nízkých teplot.

Literatura

- [1] Z historie baterií. *Ecobat: Z historie baterií*. [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <http://www.ecobat.cz/index.php/z-historie-baterii/>
- [2] Baterie - trochu historie. *Velofila: Baterie - trochu historie* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.velofiala.cz/n/baterie-trochu-historie>
- [3] Tajemství vzniku napětí v galvanickém článku. *Profi elektrika.cz: Tajemství vzniku napětí v galvanickém článku* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2005-05-10.4911115209>
- [4] Principy (59.) Tajemství vzniku napětí v galvanickém článku. *Profi elektrika.cz: Principy (59.) Tajemství vzniku napětí v galvanickém článku* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2005-05-10.4911115209>
- [5] Voltův článek. *Encyklopedie fyziky: Voltův článek* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1704-voltuv-clanek>
- [6] Jmenovité napětí. *Abeceda baterií a akumulátorů Battex: Jmenovité napětí* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/jmenovit%C3%A9+nap%C4%9Bt%C3%AD>
- [7] Objemová kapacita. *Abeceda baterií a akumulátorů Battex: Objemová kapacita* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/objemov%C3%A1+kapacita>
- [8] Zaručená kapacita. *Abeceda baterií a akumulátorů Battex: Zaručená kapacita* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/zaru%C4%8Den%C3%A1+kapacita>
- [9] Provozní životnost. *Abeceda baterií a akumulátorů Battex: Provozní životnost* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/provozn%C3%AD+%C5%BEivotnost>
- [10] Primary and secondary cells. *VCE Chemistry: primary and secondary cells* [online]. [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://chemistryvce.weebly.com/primary-and-secondary-cells.html>
- [11] KAZDA, Tomáš. *MODIFIKACE MATERIÁLŮ PRO KLADNÉ ELEKTRODY LITHNO-IONTOVÝCH AKUMULÁTORŮ*. Brno, 2015. Doktorská práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Prof. Ing. JIŘÍ VONDRÁK, Dr.Sc.
- [12] BU-106: Advantages of Primary Batteries. *Battery university: BU-106: Advantages of Primary Batteries* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-106-advantages-of-primary-batteries>

- [13] BU-106a: Choices of Primary Batteries. *Battery university: BU-106a: Choices of Primary Batteries* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-106a-choices-of-primary-batteries>
- [14] Alkaline Water Electrolysis. *SciendeDirect: Alkaline Water Electrolysis* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/alkaline-water-electrolysis>
- [15] Nikl-metal hydridová baterie. *Technoluxpro: Nikl-metal hydridová baterie* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://technoluxpro.com/cs/akkumulatory/batarei/ni-mh.html>
- [16] Rechargeable cells. *Homofaciens: Rechargeable cells* [online]. [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: https://www.homofaciens.de/technics-electrochemistry-rechargeable-cells_en.htm
- [17] Víte, jak funguje baterie?. *Proelektrotechniky.cz: Víte, jak funguje baterie?* [online]. [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/17.php>
- [18] Lead Acid Batteries. *Electropedia: Lead Acid Batteries* [online]. [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>
- [19] Nickel Cadmium Battery. *ScienceDirect: Nickel Cadmium Battery* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/nickel-cadmium-battery>
- [20] What is a Nickel Cadmium Battery?. *What is a Nickel Cadmium Battery?: UPS battery center.com* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/nickel-cadmium-battery/#prettyPhoto>
- [21] Vývoj pohonných akumulátorů. *Vývoj pohonných akumulátorů: Airsoft Team Chrudim* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: http://www.airsoftchrudim.cz/recenze/vyvoj_pohonnych_akumulatoru.html
- [22] CETL, Tomáš. *Aplikace elektrochemických zdrojů*. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02859-3.
- [23] Nickel Metal Hydride Batteries. *Electropedia: Nickel Metal Hydride Batteries* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/nimh.htm>
- [24] Nickel-metal hydride battery. *Bmet WIKI: Nickel-metal hydride battery* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: https://bmet.fandom.com/wiki/Nickel-metal_hydride_battery
- [25] RAM baterie. *Abeceda baterií a akumulátorů: RAM baterie* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/ram-baterie>
- [26] *Záporná elektroda pro lithno-iontové akumulátory*. Brno, 2015. Doktorská práce. Vysoké učení technické v brně. Vedoucí práce Prof. Ing. JIŘÍ VONDRÁK, Dr.Sc.

- [27] BUKAČKOVÁ, Ivana. *Studie stability elektrolytů a aůktrod pomocí elektrochemických metod*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kazda, Ph.D.
- [28] Skladování lithiových akumulátorů. *Battex Abeceda baterií a akumulátorů: Skladování lithiových akumulátorů* [online]. [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/skladovani-lithiovych-akumulatoru>
- [29] SVOBODA, Lukáš. *Vliv kalandrování na vlastnosti elektrod lithio-iontových baterií*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Čech, Ph.D.
- [30] MÁČA, Josef. *Kapalné elektrolyty pro lithno-iontové akumulátory s vyšší požární bezpečností*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Marie Sedlaříková, CSc.
- [31] Prismatic and Cylindrical Cells - What's the difference?. *Batery Specialist: Prismatic and Cylindrical Cells - What's the difference?* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://batteryspecialists.com.au/blogs/news/prismatic-and-cylindrical-cells-whats-the-difference>
- [32] Lithium Ion Cylindrical Cells Vs. Prismatic Cells. *Chargex Lithium Specialist: Lithium Ion Cylindrical Cells Vs. Prismatic Cells* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://www.lithiumion-batteries.com/cylindrical-vs-prismatic-cells.php>
- [33] PANCE, Štěpán. *Chladící okruhy hybridních a elektrických vozidel*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Rastislav Toman.
- [34] BU-301a: Types of Battery Cells. *Battery university: BU-301a: Types of Battery Cells* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells>
- [35] Prismatic & Pouch Battery Packs. *Epec Engineered Technologies: Prismatic & Pouch Battery Packs* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html>
- [36] Pouch, Cylindrical or Prismatic: Which Battery Format Will Rule the Market?. *Addionics: Pouch, Cylindrical or Prismatic: Which Battery Format Will Rule the Market?* [online]. [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: <https://www.addionics.com/post/pouch-cylindrical-or-prismatic-which-battery-format-will-rule-the-market>
- [37] HU, Xiaosong, Yusheng ZHENG, David A. HOWEY, Hector PEREZ, Aoife FOLEY a Michael PECHT. Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2020, **77** [cit. 2021-12-30]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2019.100806

- [38] HUBBLE, Dion, David Emory BROWN, Yangzhi ZHAO, Chen FANG, Jonathan LAU, Bryan D. MCCLOSKEY a Gao LIU. Liquid electrolyte development for low-temperature lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science* [online]. 2022, **15**(2), 550-578 [cit. 2022-05-15]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/D1EE01789F
- [39] PETZL, Mathias, Michael KASPER a Michael A. DANZER. Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study. *Journal of Power Sources* [online]. 2015, **275**, 799-807 [cit. 2022-05-24]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2014.11.065
- [40] PELED, E. The Electrochemical Behavior of Alkali and Alkaline Earth Metals in Nonaqueous Battery Systems—The Solid Electrolyte Interphase Model. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 1979, **126**(12), 2047-2051 [cit. 2021-12-26]. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/1.2128859
- [41] BUQA, H., A. WÜRSIG, J. VETTER, M.E. SPAHR, F. KRUMEICH a P. NOVÁK. SEI film formation on highly crystalline graphitic materials in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, **153**(2), 385-390 [cit. 2021-12-26]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2005.05.036
- [42] ZHANG, D, B.S HARAN, A DURAIRAJAN, R.E WHITE, Y PODRAZHANSKY a B.N POPOV. Studies on capacity fade of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2000, **91**(2), 122-129 [cit. 2021-12-26]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/S0378-7753(00)00469-9
- [43] UTSUNOMIYA, Takashi, Osamu HATOZAKI, Nobuko YOSHIMOTO, Minato EGASHIRA a Masayuki MORITA. Influence of particle size on the self-discharge behavior of graphite electrodes in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2011, **196**(20), 8675-8682 [cit. 2021-12-26]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2011.06.070
- [44] WANG, Chunsheng, A. John APPLEBY a Frank E. LITTLE. Low-Temperature Characterization of Lithium-Ion Carbon Anodes via Microperturbation Measurement. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2002, **149**(6) [cit. 2021-12-26]. ISSN 00134651. Dostupné z: doi:10.1149/1.1474427
- [45] SMART, M. C. a B. V. RATNAKUMAR. Effects of Electrolyte Composition on Lithium Plating in Lithium-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2011, **158**(4), A379-A389 [cit. 2021-12-26]. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/1.3544439
- [46] HONBO, H., K. TAKEI, Y. ISHII a T. NISHIDA. Electrochemical properties and Li deposition morphologies of surface modified graphite after grinding. *Journal of Power Sources* [online]. 2009, **189**(1), 337-343 [cit.

2021-12-26]. ISSN 03787753. Dostupné z:
doi:10.1016/j.jpowsour.2008.08.048

- [47] KIM, Woo-Sung a Woo-Young YOON. Observation of dendritic growth on Li powder anode using optical cell. *Electrochimica Acta* [online]. 2004, **50**(2-3), 541-545 [cit. 2021-12-26]. ISSN 00134686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2004.03.066
- [48] HEISKANEN, Satu Kristiina, Jongjung KIM a Brett L. LUCHT. *Generation and Evolution of the Solid Electrolyte Interphase of Lithium-Ion Batteries* [online]. 2322-2333 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: doi:10.1016/j.joule.2019.08.018

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

li-ion	Lithium-ion
Ni-MH	Nikl-metalhydrid
Ni-Cd	Nikl-kadmium
PTC	Positiv temperature coefficient – nadproudová ochrana
CID	Circuit interrupt device – ochranná součástka li-ion baterie
LTO	Lithium titanate – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
SOC	State of charge – aktivní stav nabití
SOH	state of health – míra opotřebování článku
SEI	Solid electrolyte interface – rozhraní pevného elektrolytu

Symboly:

U	Napětí	[V]
I	Proud	[A]
Q	Kapacita	[Ah]
ρ	Hustota	[kgm^{-3}]
E	Energie	[Wh]
C	Násobek kapacity	[C*Q]
T	Teplota	[°C]
t	Čas	[h]
R_i	Vnitřní odpor	[Ω]

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - TECHNICKÉ LISTY	105
PŘÍLOHA B - TABULKA POROVNÁNÍ BATERÍ.....	108
PŘÍLOHA C - GRAFY	114

Příloha A - Technické listy



PRODUCT SPECIFICATION CONFIDENTIAL

Description
Lithium Ion INR18650 MH1 3200mAh

Date
2014-03-06

Rev.
0

1. General Information

1.1 Scope

This product specification defines the requirements of the rechargeable lithium ion battery to be supplied to the Customer by LG Chem.

1.2 Product classification: Cylindrical rechargeable lithium ion battery

1.3 Model name: INR18650 MH1

2. Nominal Specification

Item	Condition / Note	Specification
2.1 Energy (Power)	Std. charge / discharge	Nominal 3200 mAh Minimum 3100 mAh
2.2 Nominal Voltage	Average	3.67V
2.3 Standard Charge (Refer to 4.1.1)	Constant current Constant voltage End current(Cut off)	0.5C (1550mA) 4.2V 50mA
2.4 Max. Charge Voltage		4.2 ± 0.05V
2.5 Max. Charge Current		1.0 C (3100mA)
2.6 Standard Discharge (Refer to 4.1.2)	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (620mA) 2.5V
2.7 Max. Discharge Current		10A
2.8 Weight	Approx.	Max. 49.0 g
2.9 Operating Temperature	Charge Discharge	0 ~ 45℃ -20 ~ 60℃
2.10 Storage Temperature (for shipping state)	1 month 3 month 1 year	-20 ~ 60℃ -20 ~ 45℃ -20 ~ 20℃



AA Portable Power Corp
 825 S 19th Street, Richmond, CA 94804
 Tel: 510-525-2328 Fax: 510-439-2808
<http://www.batteryspace.com> Sales@batteryspace.com

1. Scope

This document describes the Product Specification of the LiFePO4 rechargeable cell supplied by AA Portable Power Corp .

2. Model : LFP-26650-3300

3. Specification

No.	Items	Specifications
1	Charge cut-off voltage	3.65V
2	Nominal voltage	3.2V
3	Minimal capacity	3200mAh @ 0.2C Discharge
4	Nominal capacity	3300mAh @0.2C Discharge
5	Standard charge current	0.2C
6	Standard charging method	0.2C CC (constant current) charge to 3.65V, then CV (constant voltage 3.65V) charge till charge current decline to $\leq 0.05C$
7	Charging time	Standard charge: 7.0 hours Ref
8	Max. charge current	2C
9	Max. continue discharge current	10A (Cell skin temperature cannot exceed 80°C)
10	Discharge cut-off voltage	2.0V
11	Operating temperature	Charging: 0°C ~ 45°C Discharging: -20°C ~ 60°C (Cell skin temperature cannot exceed 80°C)
12	Storage temperature/humidity	Temperature -10°C ~ +35°C Humidity 65%±20%RH (Recommended to store 23 ± 5°C for long term storage)
13	Cell Weight	80.0g±1.0g
14	Cell Dimension	Length: 65.5±0.3 mm Width: 26.3±0.2 mm

The technical specification of the lithium titanate cell

THE ADVANTAGES OF THE LTO1865-13 CELLS

- Professionally produced LTO (lithium titanium) cells
- Stability during high current discharge – support up to 15 C continually, 20 C peak discharge
- Support for high speed charging – up to 6 C charging currents
- The discharge with long linear voltage level (2.60 V to 2.30 V)
- Round 18650 style design of the cell for easy integration
- Minimal overheating or heat release during operation

Specifications	
Model name	LTO1865-13
Nominal voltage (V)	2.40 V
Nominal capacity (Ah) Minimal capacity (Ah)	1300 mAh, 1250 mAh
Max voltage per cell (V)	2.80 V
Balancing voltage per cell (V)	2.75 V
Discharge voltage (V)	1.85 V
Minimal voltage per cell (V)	1.50 V
Operating voltage (V)	1.85 V to 2.75 V
Optimal discharge current (Amp)	< 1.3 A (1 C)
Maximal discharge current (Amp)	< 13 A (10 C)
Max peak discharge current (Amp)	< 26 A (20 C, < 10 seconds)
Optimal charge current (Amp)	< 1.3 A (1 C)
Maximal charge current (Amp)	< 6 A (5 C)
Internal resistance (mOhm)	< 20 mOhm
Cycle life (80 % DOD at 20 °C, at 0.5 C charge)	> 5 000 cycles at 3 C discharge > 10 000 cycles at 1 C discharge > 20 000 cycles at 0.5 C discharge
Self discharge rate (% per month)	< 3 %
Operating temperature (charging)	-15 °C to + 45 °C
Operating temperature (discharging)	-25 °C to + 55 °C
Temperature / Capacity	25 °C = 100 % 0 °C > 80 % -10 °C > 70 % -20 °C > 60 %
Dimensions - width x length x thick (mm)	65x19 mm
Weight (tolerance +/- 3 g)	> 39 g

Příloha B - Tabulka porovnání baterií

Tabulka 5.1 Porovnání naměřených hodnot za pokojové teploty u baterií Gooweí.

Změřené údaje - normální teplota						
Parametr	Hodnota - sada 1			Hodnota - sada 2		
	200 Cyklů	1C	2C	200 Cyklů	1C	2C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2 949,98	2 791,85	2 764,41	2 796,95	2 779,62	2 791,84
Kapacita na konci měření [mAh]	2 808,55	2 784,56	2 762,97	2 704,06	2 772,27	2 786,08
Ztráta kapacity [mAh]	141,43	7,29	1,44	92,89	7,35	5,76
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	4,79	0,26	0,05	3,32	0,26	0,21
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	7,81	12,75	13,61	12,60	13,14	12,76
Teplota na začátku měření [°C]	26,18	29,89	42,40	29,01	33,86	44,12
Teplota na konci měření [°C]	26,88	31,53	42,63	29,01	33,39	43,46
Minimální teplota [°C]	23,85	29,89	41,85	28,18	33,39	43,46
Maximální teplota [°C]	28,70	31,86	42,63	32,09	34,06	44,33
Teplotní rozdíl [°C]	4,85	1,98	0,79	3,91	0,67	0,87

Tabulka 5.2 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u baterií Goowei.

Změřené údaje - snížená teplota					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2444,35	2045,73	2318,31	2272,60	2068,52
Kapacita na konci měření [mAh]	1916,09	374,92	2302,06	2118,21	1910,44
Ztráta kapacity [mAh]	528,26	1670,81	16,25	154,39	158,08
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	21,61	81,67	0,70	6,79	7,64
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	23,61	36,07	27,55	28,98	35,36
Teplota na začátku měření [°C]	1,04	3,64	11,10	25,79	35,68
Teplota na konci měření [°C]	0,97	10,23	11,33	25,87	37,52
Minimální teplota [°C]	-0,38	3,64	11,10	25,35	35,68
Maximální teplota [°C]	1,37	10,44	11,33	25,87	37,52
Teplotní rozdíl [°C]	1,76	6,80	0,24	0,52	1,84

Tabulka 5.3 Porovnání naměřených hodnot za pokojové teploty u baterií LGEB

Změřené údaje - normální teplota							
Parametr	Hodnota - sada 1				Hodnota - sada 2		
	200 Cyklů	1C	2C	3C	200 Cyklů	1C	2C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2872,94	2842,04	2368,42	1925,15	3089,72	3145,46	3237,80
Kapacita na konci měření [mAh]	2727,20	2778,09	2358,28	1939,69	2903,12	3119,50	3233,92
Ztráta kapacity [mAh]	145,74	63,95	10,14	-14,53	186,60	25,96	3,88
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	5,07	2,25	0,43	-0,75	6,04	0,83	0,12
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	10,22	11,19	25,99	39,84	3,45	1,70	-1,18
Teplota na začátku měření [°C]	27,04	32,82	42,02	50,35	29,55	35,23	25,93
Teplota na konci měření [°C]	25,78	33,22	42,69	50,36	30,75	35,00	24,97
Minimální teplota [°C]	24,24	32,01	42,02	50,35	28,60	34,97	24,97
Maximální teplota [°C]	29,60	34,49	43,37	51,01	32,82	35,23	25,99
Teplotní rozdíl [°C]	5,36	2,48	1,35	0,66	4,22	0,26	1,02

Tabulka 5.4 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u baterií LGEB

Změřené údaje - snížená teplota					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2332,60	2481,02	2444,76	2756,85	2700,81
Kapacita na konci měření [mAh]	74,54	67,04	2434,59	2713,13	2650,32
Ztráta kapacity [mAh]	2258,06	2413,98	10,17	43,72	50,49
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	96,80	97,30	0,42	1,59	1,87
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	27,11	22,47	23,60	13,85	15,60
Teplota na začátku měření [°C]	-0,69	7,16	0,85	-5,07	-5,26
Teplota na konci měření [°C]	-3,28	-2,50	0,64	-5,34	-5,27
Minimální teplota [°C]	-3,71	-5,37	0,64	-5,34	-5,42
Maximální teplota [°C]	4,11	12,89	1,03	-5,03	-5,18
Teplotní rozdíl [°C]	7,82	18,26	0,39	0,31	0,24

Tabulka 5.5 Vybraná data z impedanční spektrometrie v nabitěm stavu

Nabitý stav					
Před cyklováním		Po zátěžovém cyklování		Po cyklování 200 cykly	
freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm
5733,64	0,0495	5733,64	0,0625	5733,64	0,0499
2213,54	0,0419	2213,54	0,0554	2213,54	0,0483
853,09	0,0420	853,09	0,0553	853,09	0,0493
328,84	0,0439	328,84	0,0569	328,84	0,0514
126,83	0,0464	126,83	0,0591	126,83	0,0541
48,95	0,0488	48,95	0,0614	48,95	0,0572
18,87	0,0509	18,87	0,0636	18,87	0,0603
7,27	0,0528	7,27	0,0662	7,27	0,0638
2,81	0,0540	2,81	0,0683	2,81	0,0675

Tabulka 5.6 Vybraná data z impedanční spektrometrie za vybitého stavu

Vybitý stav					
Před cyklováním		Po zátěžovém cyklování		Po cyklování 200 cyklů	
freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm	freq/Hz	Re(Z)/Ohm
5733,64	0,0511	5733,64	0,0605	5733,64	0,0598
2213,54	0,0441	2213,54	0,0533	2213,54	0,0535
853,09	0,0447	853,09	0,0533	853,09	0,0540
328,84	0,0474	328,84	0,0552	328,84	0,0563
126,83	0,0508	126,83	0,0578	126,83	0,0595
48,95	0,0545	48,95	0,0610	48,95	0,0632
18,87	0,0583	18,87	0,0650	18,87	0,0668
7,27	0,0628	7,27	0,0700	7,27	0,0696
2,81	0,0702	2,81	0,0774	2,81	0,0710

Tabulka 5.7 Porovnání naměřených hodnot za pokojové teploty u LiFePO₄

Změřené údaje - normální teplota								
Parametr	Hodnota - sada 1				Hodnota - sada 2			
	200 Cyklů	1C	2C	3C	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	3276,90	3172,19	3190,03	3196,25	3458,31	3416,16	3429,58	3429,91
Kapacita na konci měření [mAh]	3197,21	3189,53	3201,38	3194,05	3406,89	3430,85	3427,62	3424,40
Ztráta kapacity [mAh]	79,69	-17,34	-11,35	2,20	51,42	-14,69	1,97	5,51
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	2,43	-0,55	-0,36	0,07	1,49	-0,43	0,06	0,16
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	0,70	3,87	3,33	3,14	-4,80	-3,52	-3,93	-3,94
Teplota na začátku měření [°C]	28,60	29,91	40,09	49,44	26,45	30,13	35,46	41,84
Teplota na konci měření [°C]	24,14	31,18	39,92	49,23	26,32	29,86	35,13	40,91
Minimální teplota [°C]	23,23	29,91	39,71	49,11	25,49	29,86	35,13	40,80
Maximální teplota [°C]	28,60	31,60	40,54	49,74	28,72	30,38	36,54	41,84
Teplotní rozdíl [°C]	5,38	1,69	0,83	0,63	3,23	0,51	1,41	1,04

Tabulka 5.8 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u LiFePO₄

Změřené údaje - snížená teplota					
Parametr	Hodnota - baterie 1	Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	2229,78	2511,06	2845,32	2827,67	2745,84
Kapacita na konci měření [mAh]	2371,51	243,04	2745,88	2715,14	2563,65
Ztráta kapacity [mAh]	-141,73	2268,02	99,45	112,53	182,19
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	-6,36	90,32	3,50	3,98	6,64
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	32,43	23,91	13,78	14,31	16,79
Teplota na začátku měření [°C]	4,95	-1,00	6,51	10,64	14,36
Teplota na konci měření [°C]	-4,79	-1,66	5,55	9,84	13,28
Minimální teplota [°C]	-4,79	-2,75	5,55	9,80	13,28
Maximální teplota [°C]	6,40	2,27	6,77	10,64	14,36
Teplotní rozdíl [°C]	11,19	5,03	1,21	0,84	1,08

Tabulka 5.9 Porovnání naměřených hodnot baterií LTO

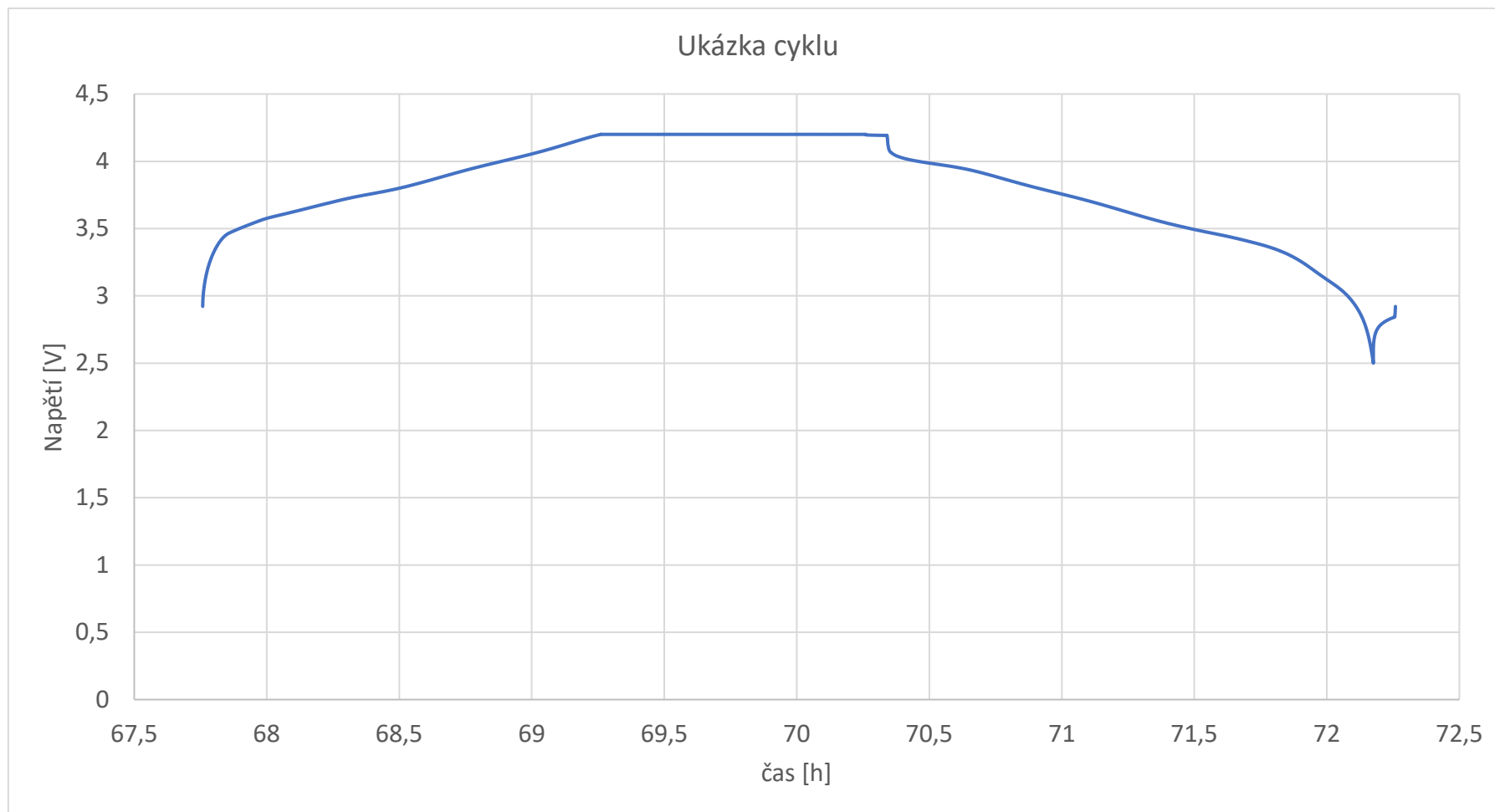
Změřené údaje - normální teplota					
Parametr	Hodnota - sada 1	Hodnota - sada 2			
	200 Cyklů	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	1136,36	1365,07	1360,34	1348,78	1335,50
Kapacita na konci měření [mAh]	960,40	1329,31	1359,58	1347,89	1335,41
Ztráta kapacity [mAh]	175,97	35,76	0,76	0,90	0,09
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	15,49	2,62	0,06	0,07	0,01
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	12,59	-5,01	-4,64	-3,75	-2,73
Teplota na začátku měření [°C]	23,49	24,71	26,54	28,31	31,46
Teplota na konci měření [°C]	25,83	25,12	26,23	27,73	30,09
Minimální teplota [°C]	20,97	24,18	26,15	27,73	29,75
Maximální teplota [°C]	26,98	27,62	26,69	29,37	31,46
Teplotní rozdíl [°C]	6,01	3,44	0,54	1,64	1,70

Tabulka 5.10 Porovnání naměřených hodnot za nízké teploty u LTO

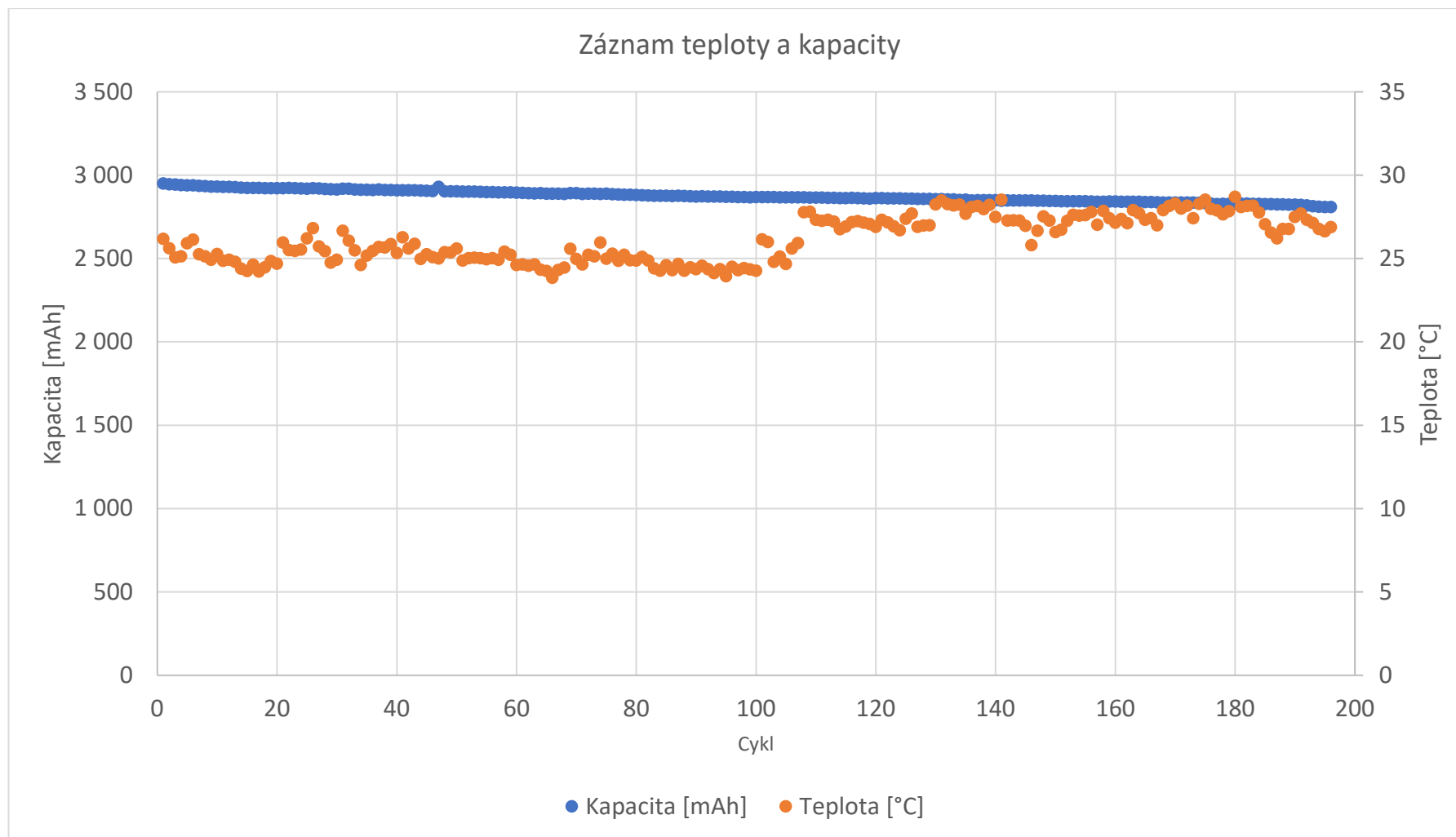
Změřené údaje - snížená teplota								
Parametr	Hodnota - baterie 1				Hodnota - baterie 2			
	200 Cyklů	1C	2C	3C	200 Cyklů	1C	2C	3C
Kapacita na začátku měření [mAh]	923,15	720,47	691,50	693,35	1259,21	1232,14	1224,43	1216,31
Kapacita na konci měření [mAh]	770,50	714,64	692,17	689,40	1221,51	1243,71	1227,90	1219,00
Ztráta kapacity [mAh]	152,64	5,83	-0,68	3,95	37,70	-11,57	-3,47	-2,69
Procentuální ztráta kapacity po cyklování [%]	16,54	0,81	-0,10	0,57	2,99	-0,94	-0,28	-0,22
Procentuální rozdíl kapacity oproti výrobci [%]	28,99	44,58	46,81	46,67	3,14	5,22	5,81	6,44
Teplota na začátku měření [°C]	-2,36	-0,47	3,01	6,19	-1,41	-0,27	3,79	6,47
Teplota na konci měření [°C]	-2,66	-0,71	2,64	5,68	-1,10	0,10	3,57	6,08
Minimální teplota [°C]	-5,07	-0,71	2,59	5,68	-2,11	-0,28	3,21	6,01
Maximální teplota [°C]	-1,74	-0,45	3,01	6,34	-0,49	0,24	3,79	6,47
Teplotní rozdíl [°C]	3,33	0,26	0,42	0,66	1,62	0,52	0,58	0,46

Příloha C - Grafy

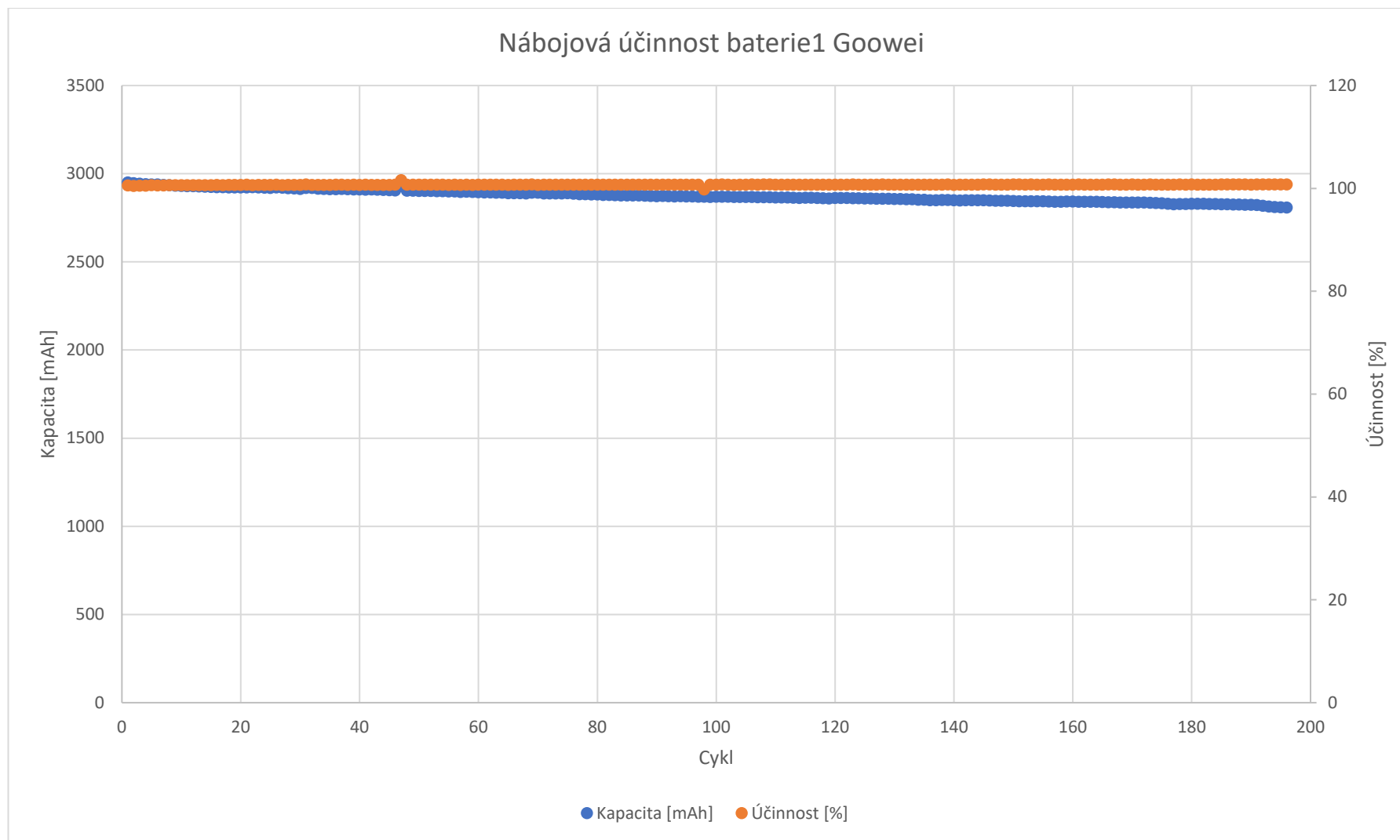
Vložené grafy jsou orientovány na šířku strany kvůli lepší přehlednosti.



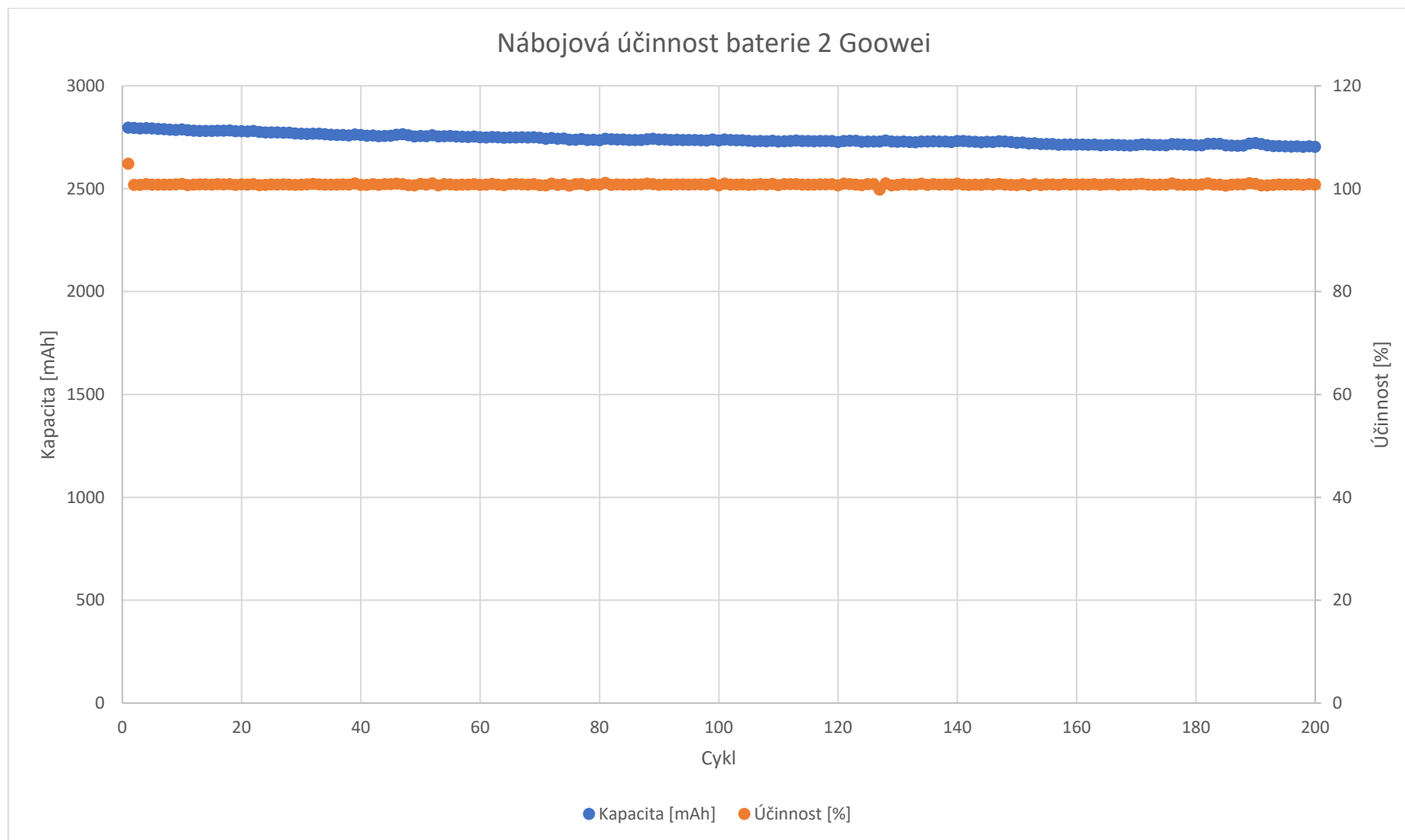
Graf 5.1 Ukázka cyklu (15) baterie Gooweí za pokojové teploty



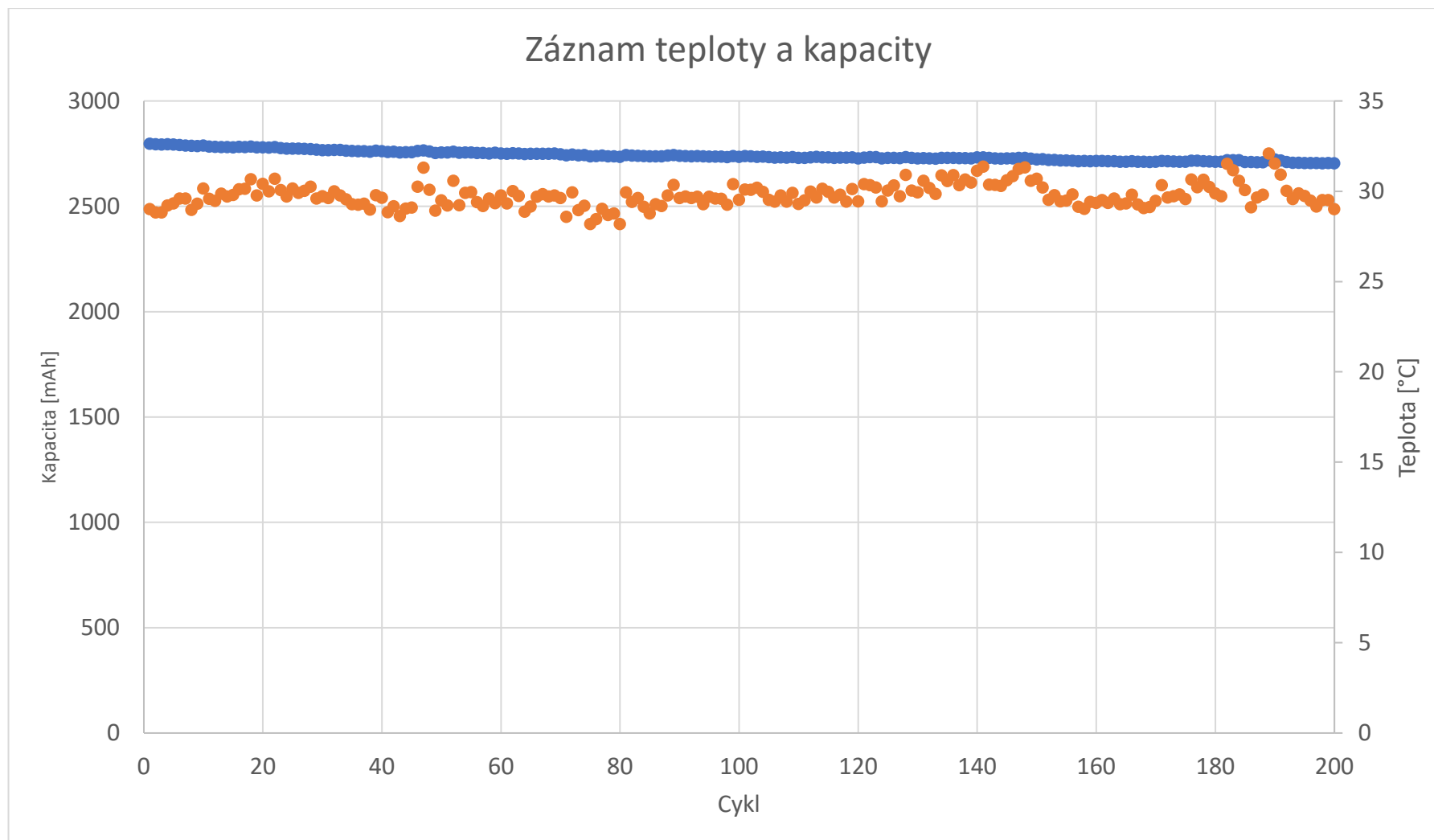
Graf 5.2 Záznam teploty a kapacity baterie 1 Goawei za pokojové teploty



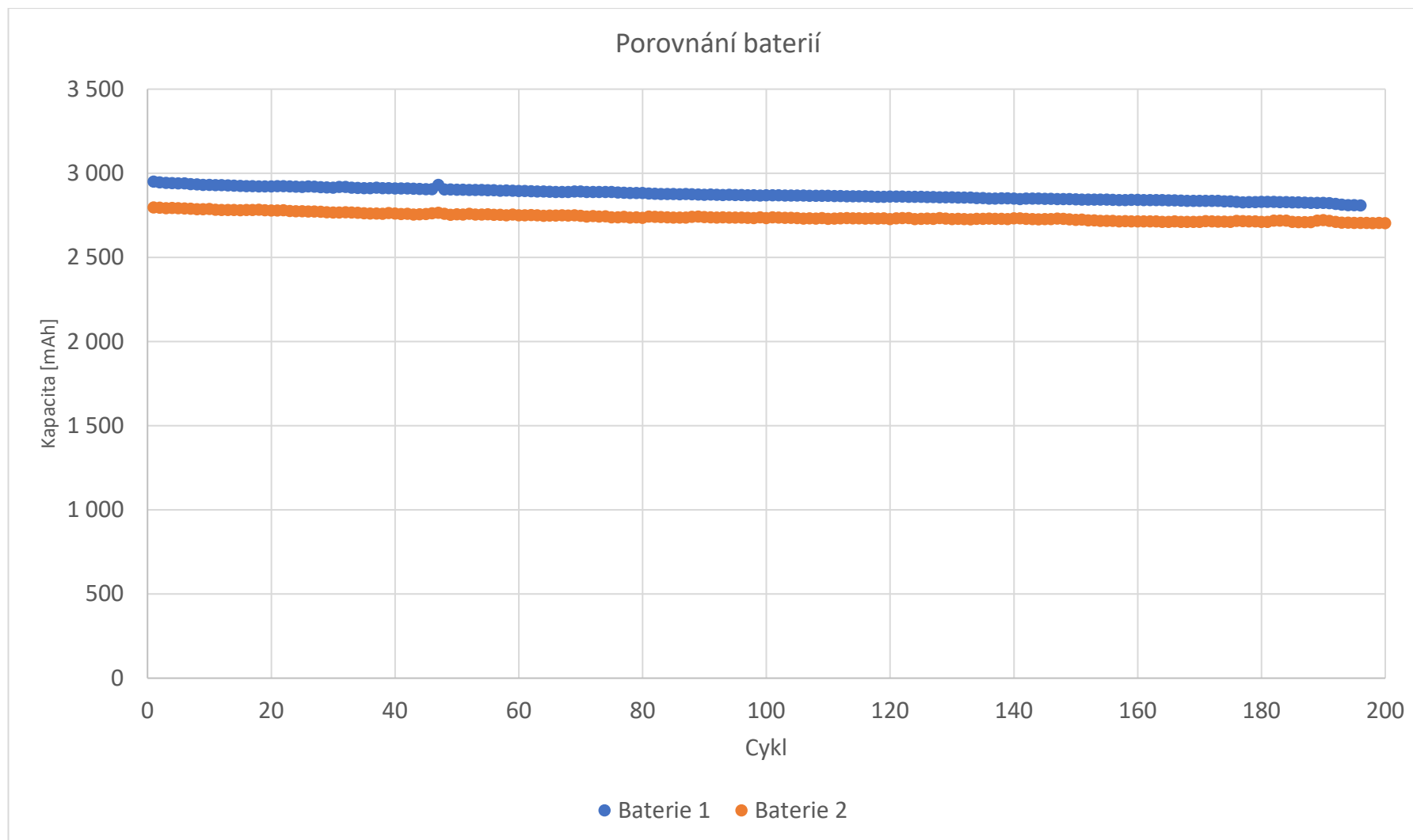
Graf 5.3 Nábojová účinnost baterie 1 Goowe



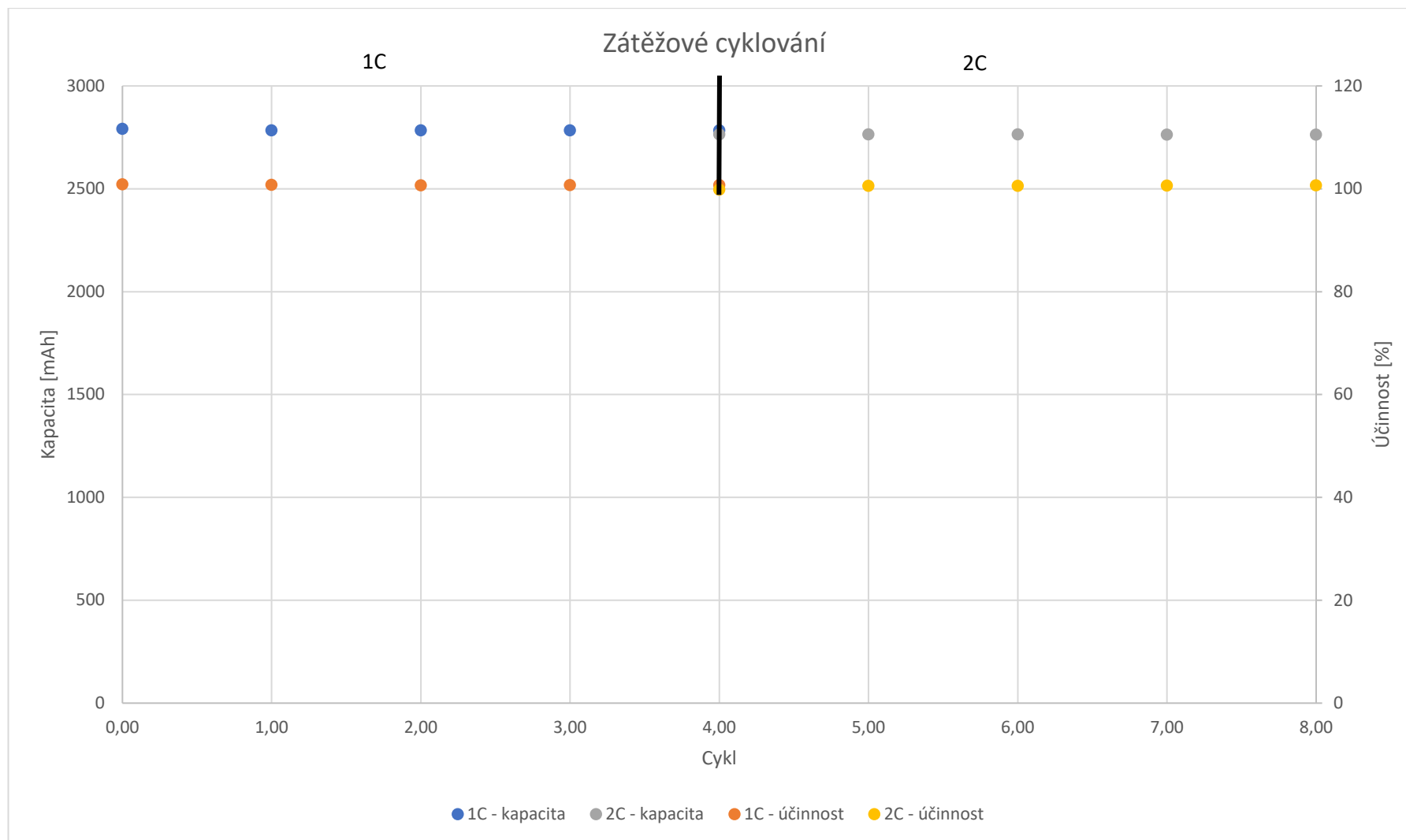
Graf 5.4 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za pokojové teploty



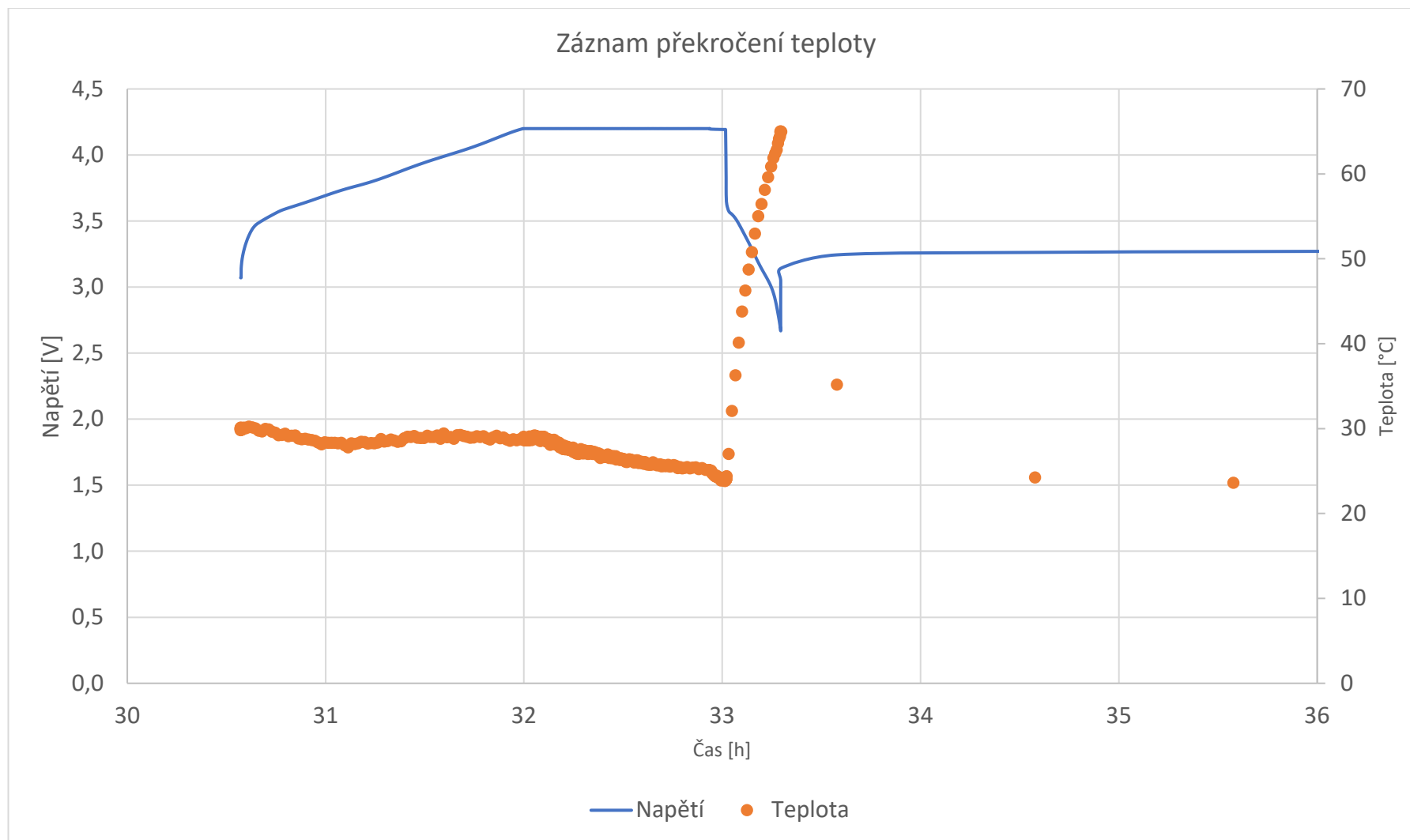
Graf 5.5 Záznam teploty a kapacity baterie 2 Goowei za pokojové teploty



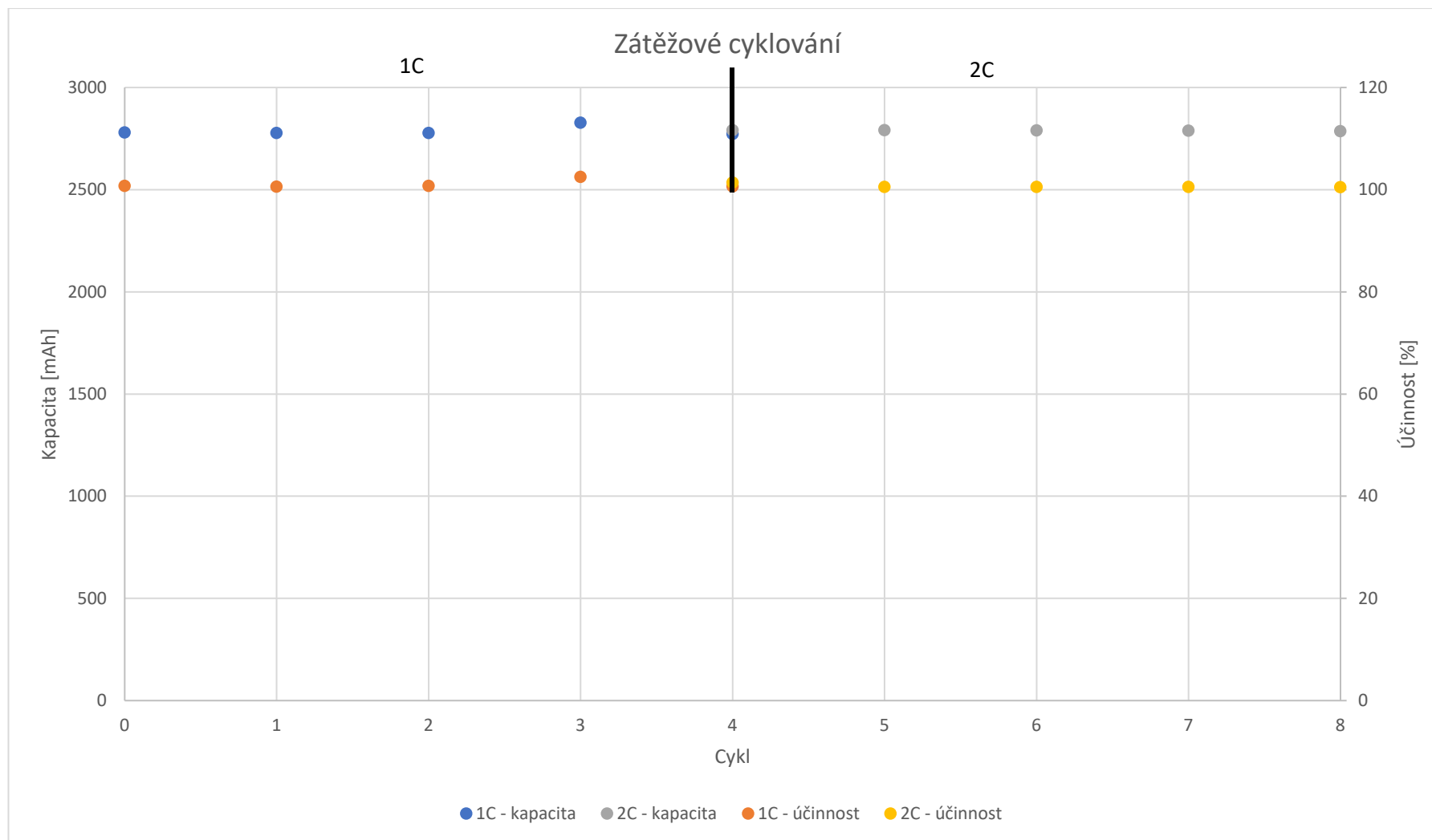
Graf 5.6 Porovnání baterií Goowei za pokojové teploty



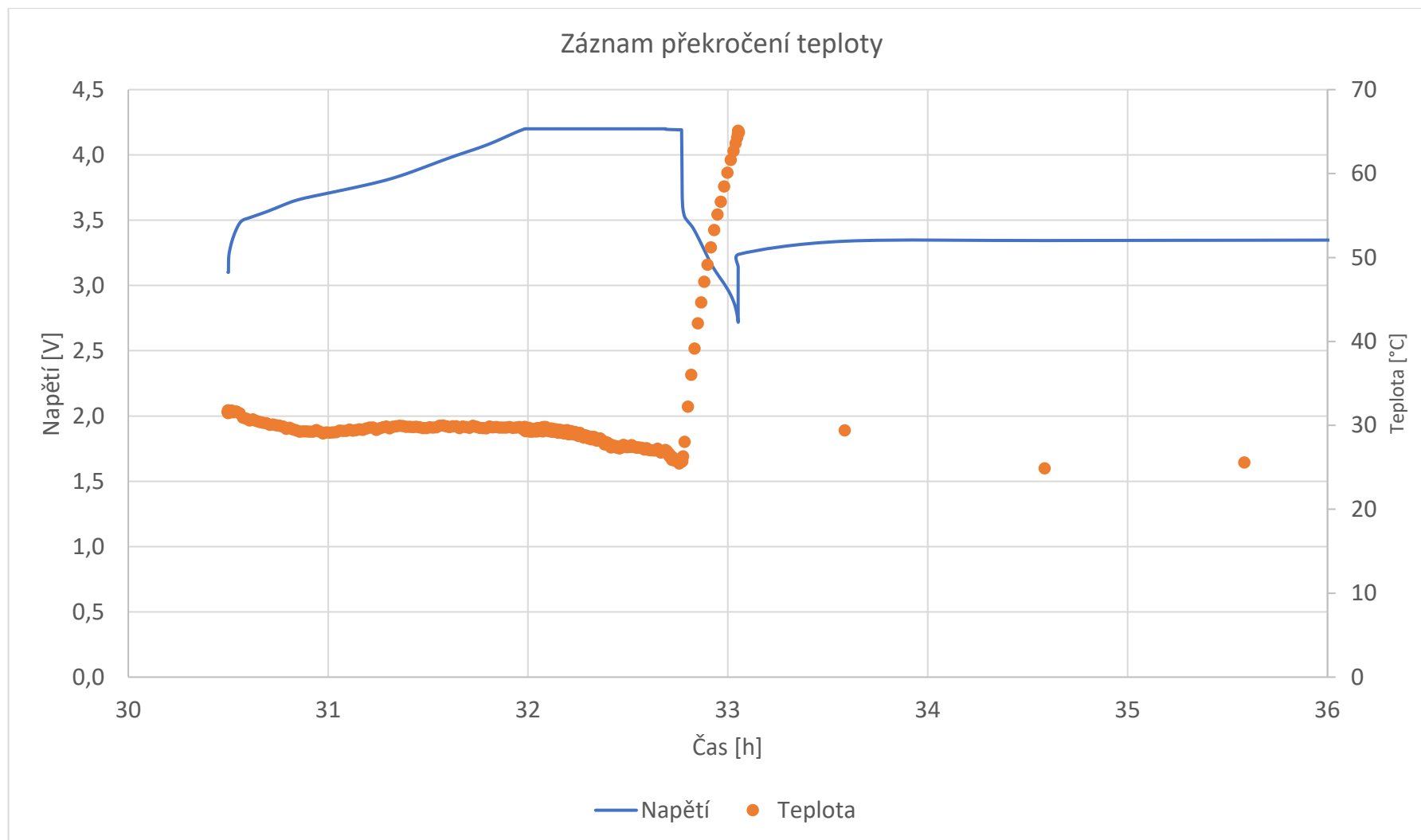
Graf 5.7 Zátěžové cyklování baterie 1 Goovei za pokojové teploty



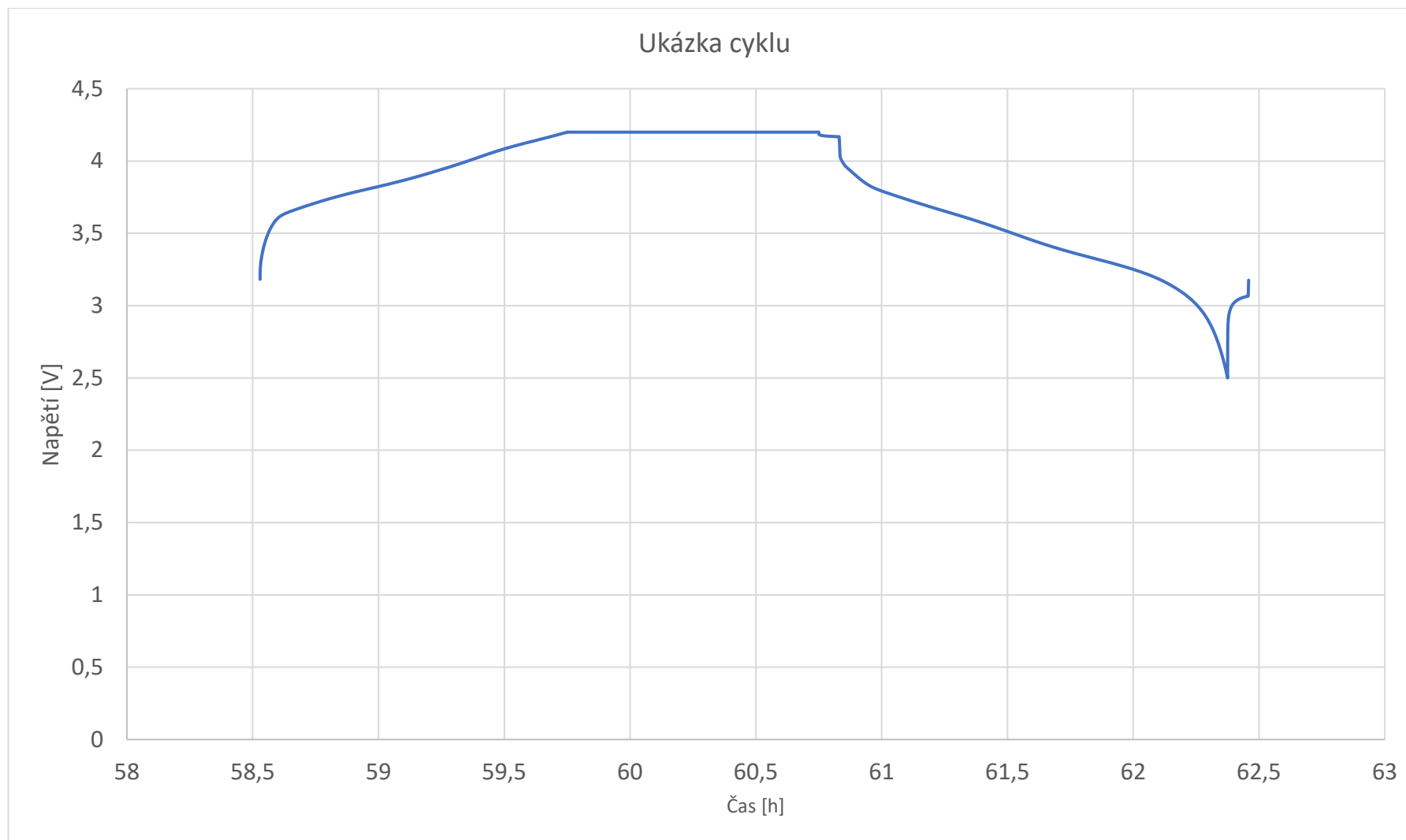
Graf 5.8 Překročení teploty baterie 1 Gooweí při zátěži 3C za pokojové teploty



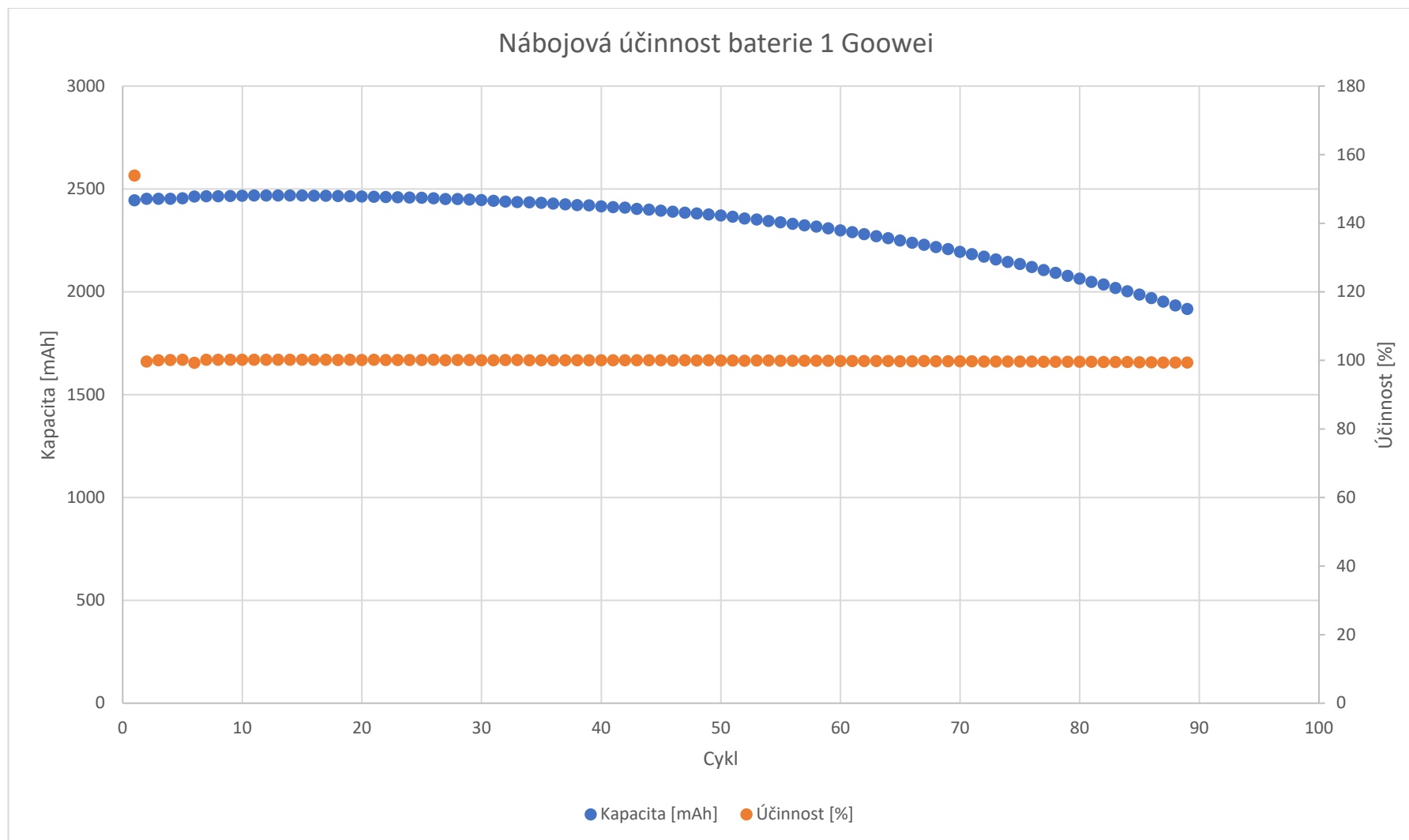
Graf 5.9 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei za pokojové teploty



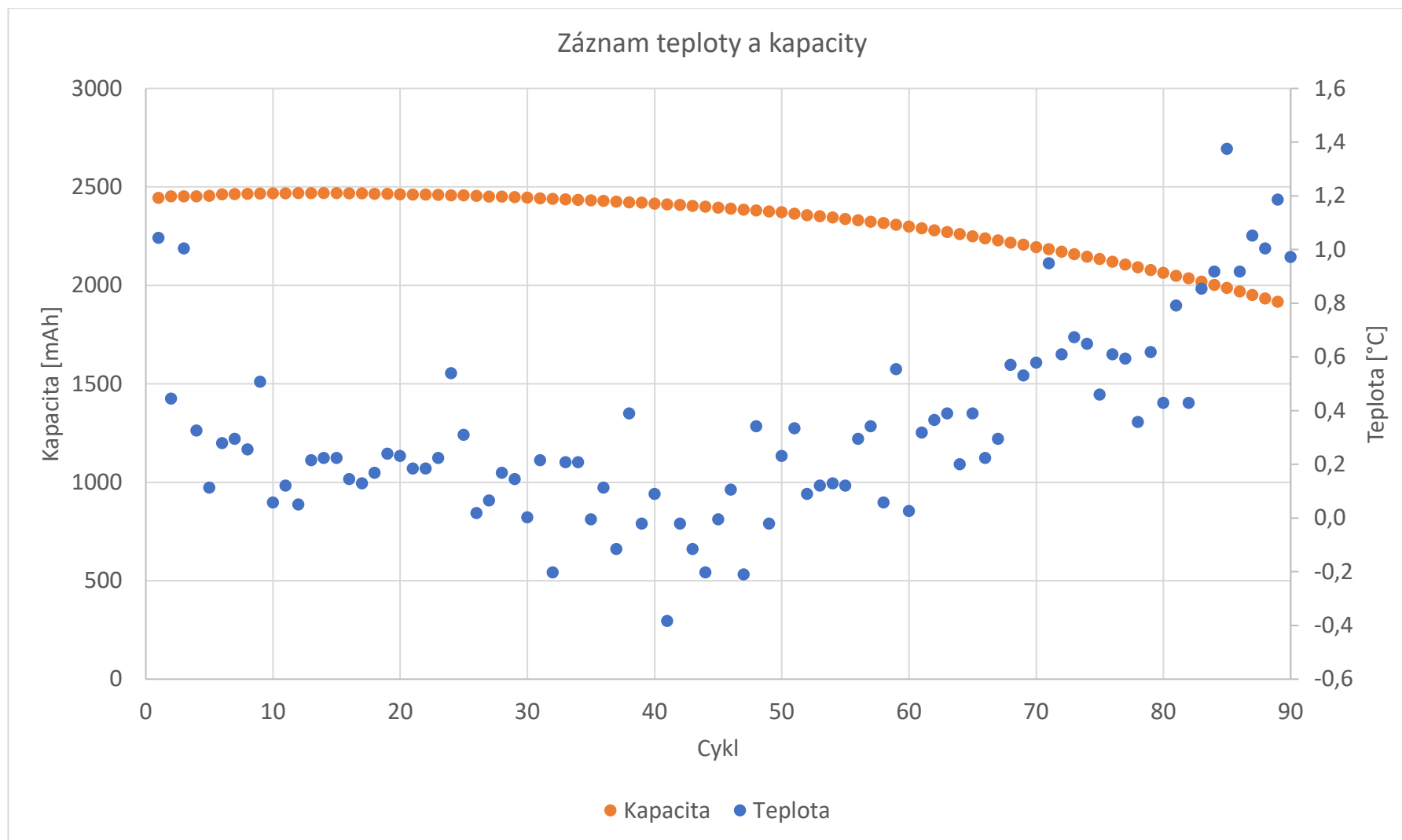
Graf 5.10 Překročení teploty při zátěžovém cyklování baterie 2 Goowei



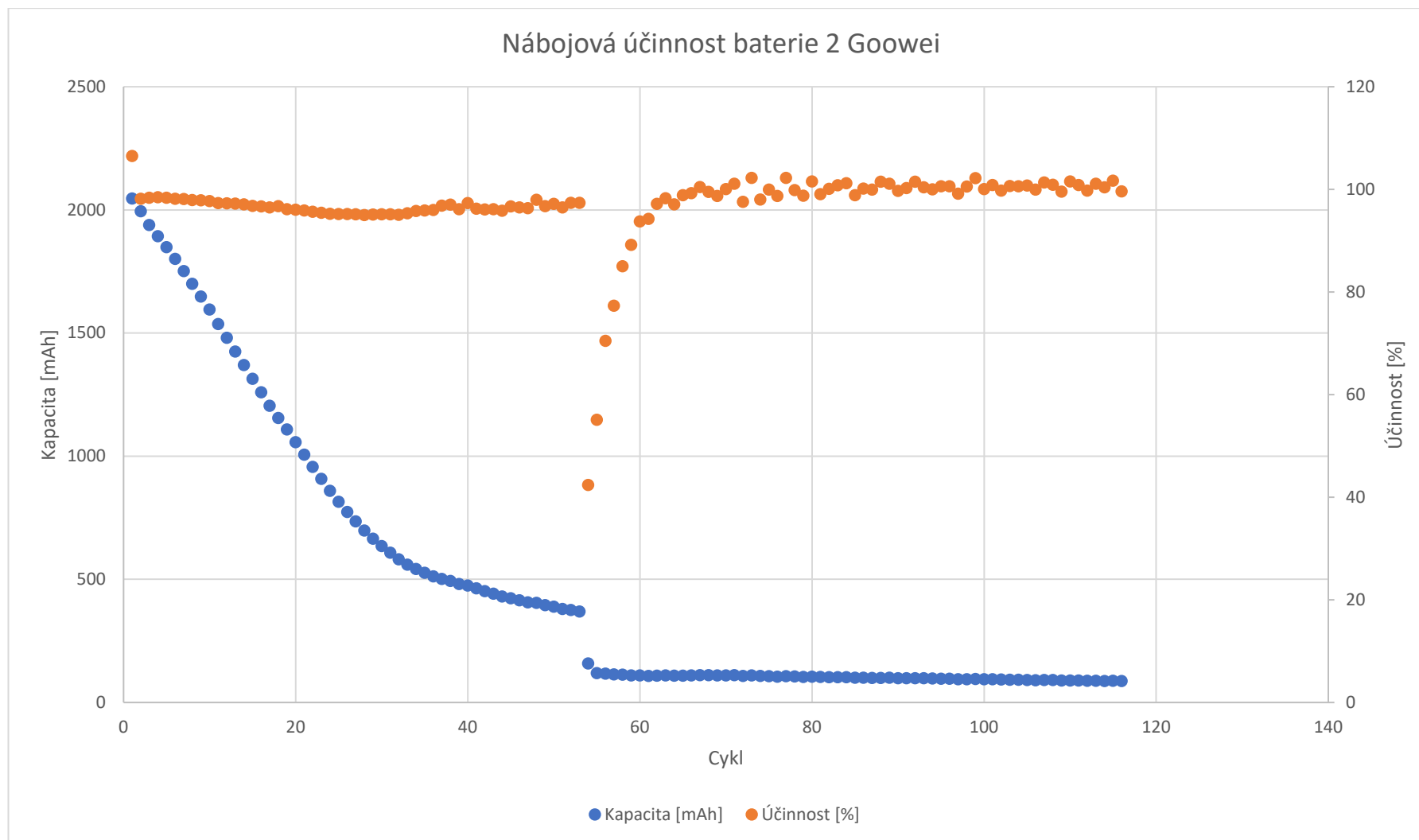
Graf 5.11 Ukázka cyklu (15) baterie Gooweí za snížené teploty



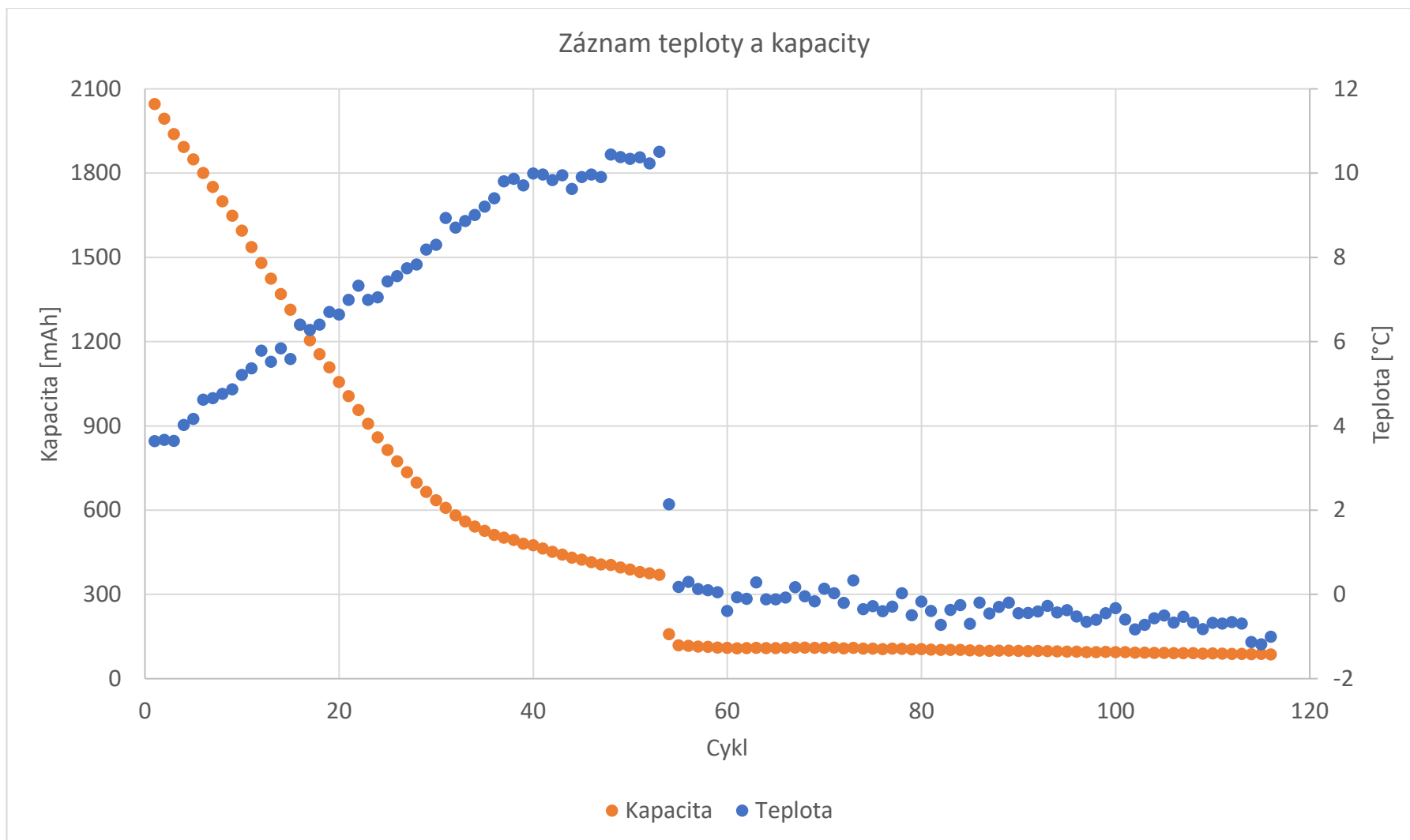
Graf 5.12 Nábojová účinnost baterie 1 Goowei za snížené teploty



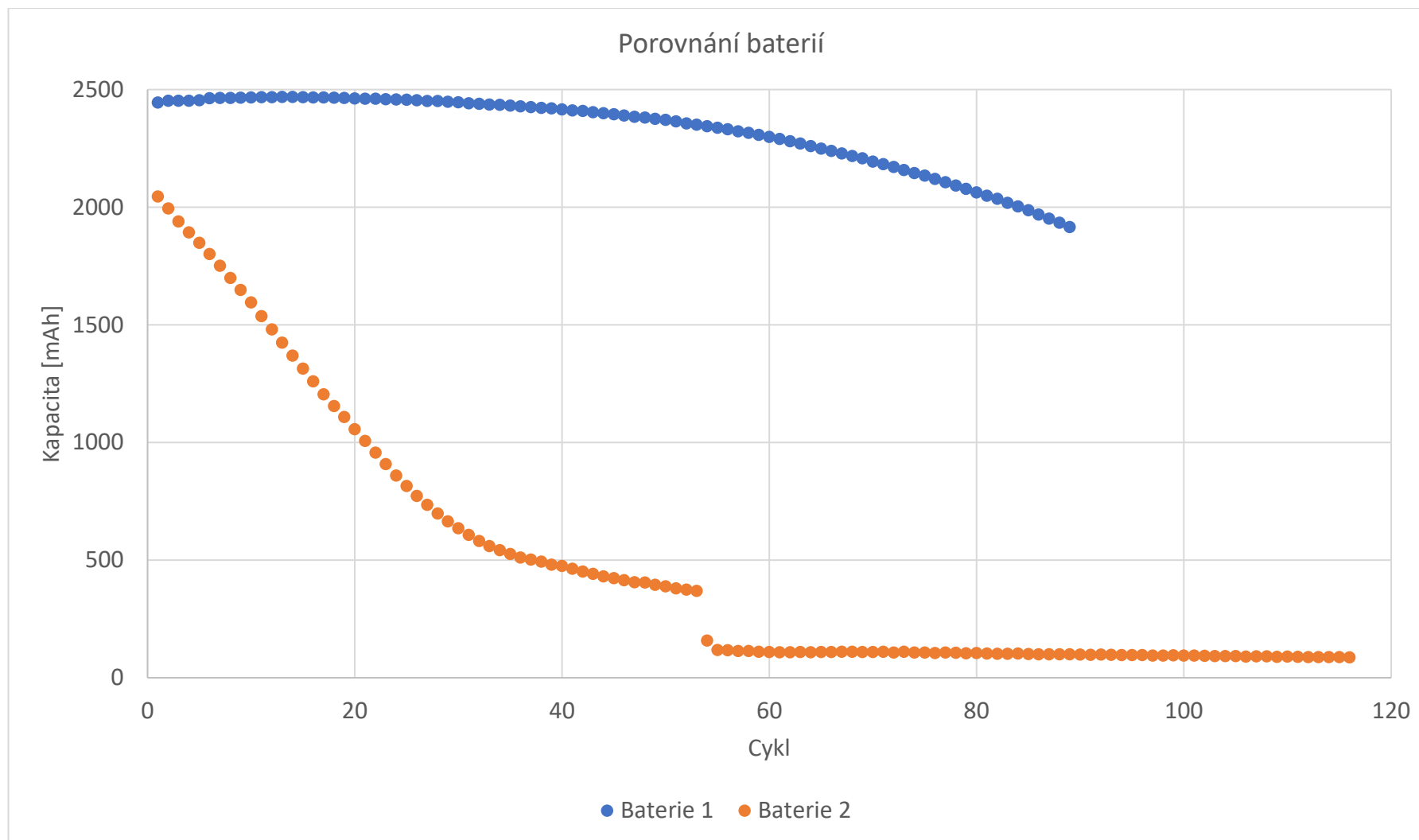
Graf 5.13 Záznam teploty a kapacity baterie 1 Goowei za snížené teploty



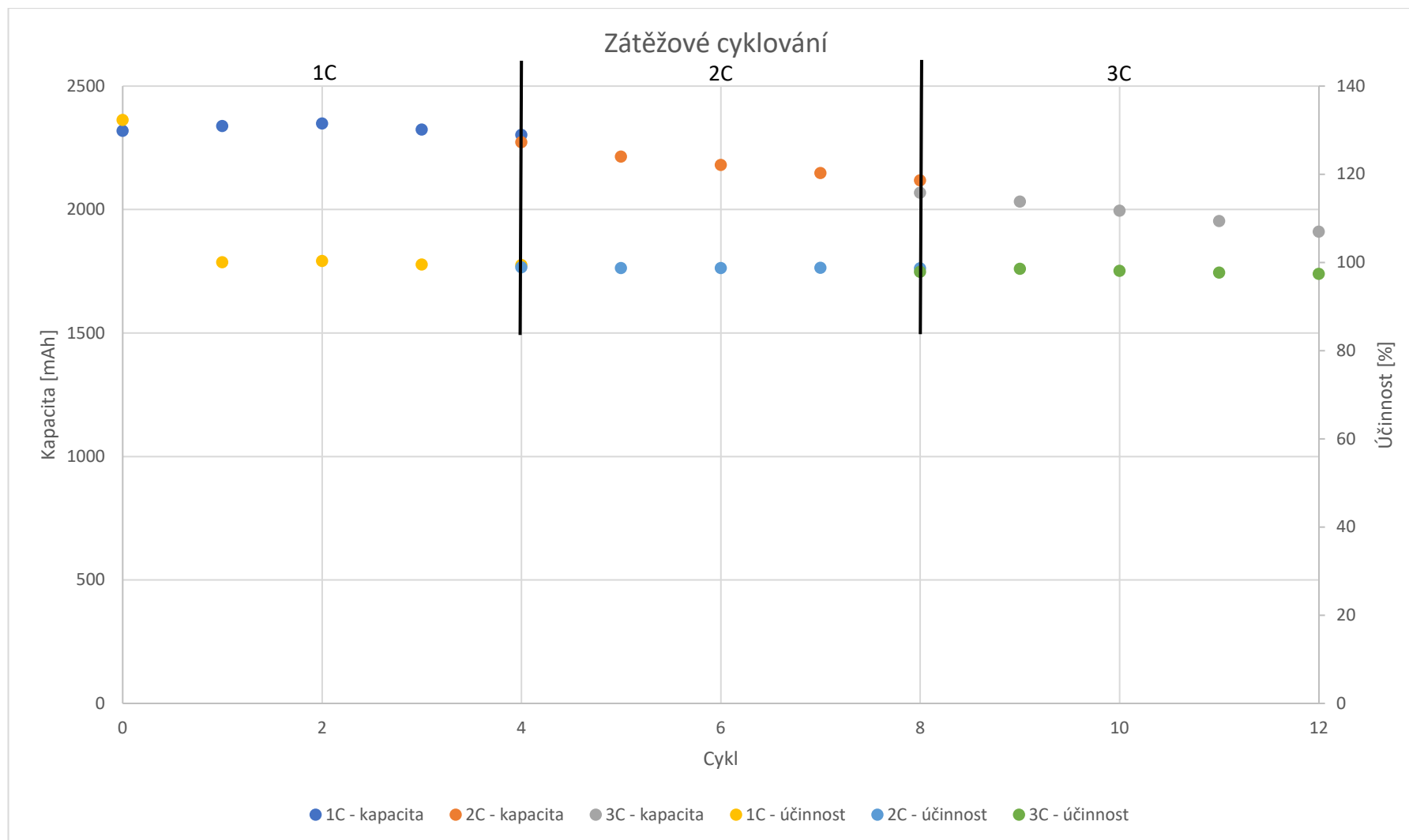
Graf 5.14 Nábojová účinnost baterie 2 Goowei za snížené teploty



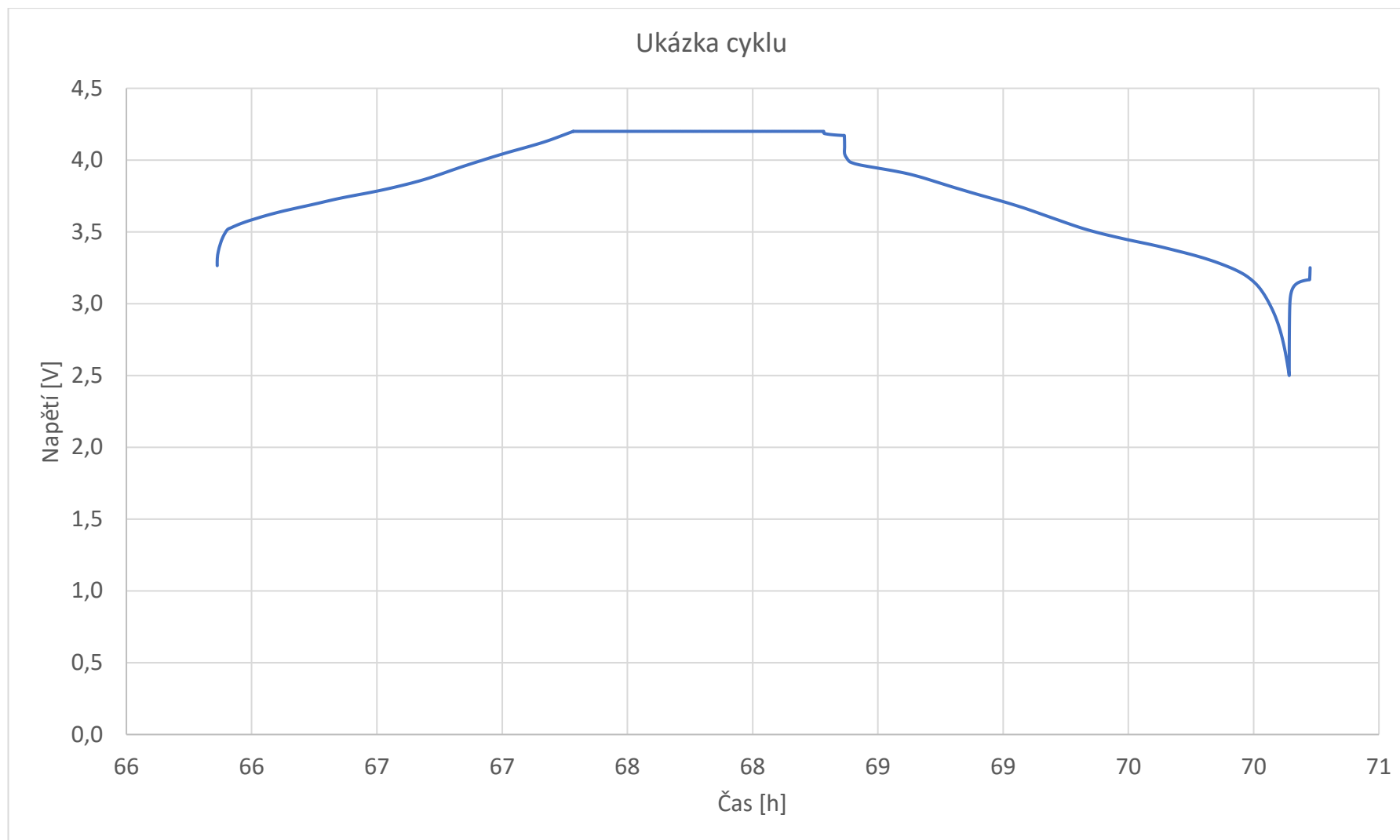
Graf 5.15 Záznam teploty a kapacity baterie 2 za snížené teploty



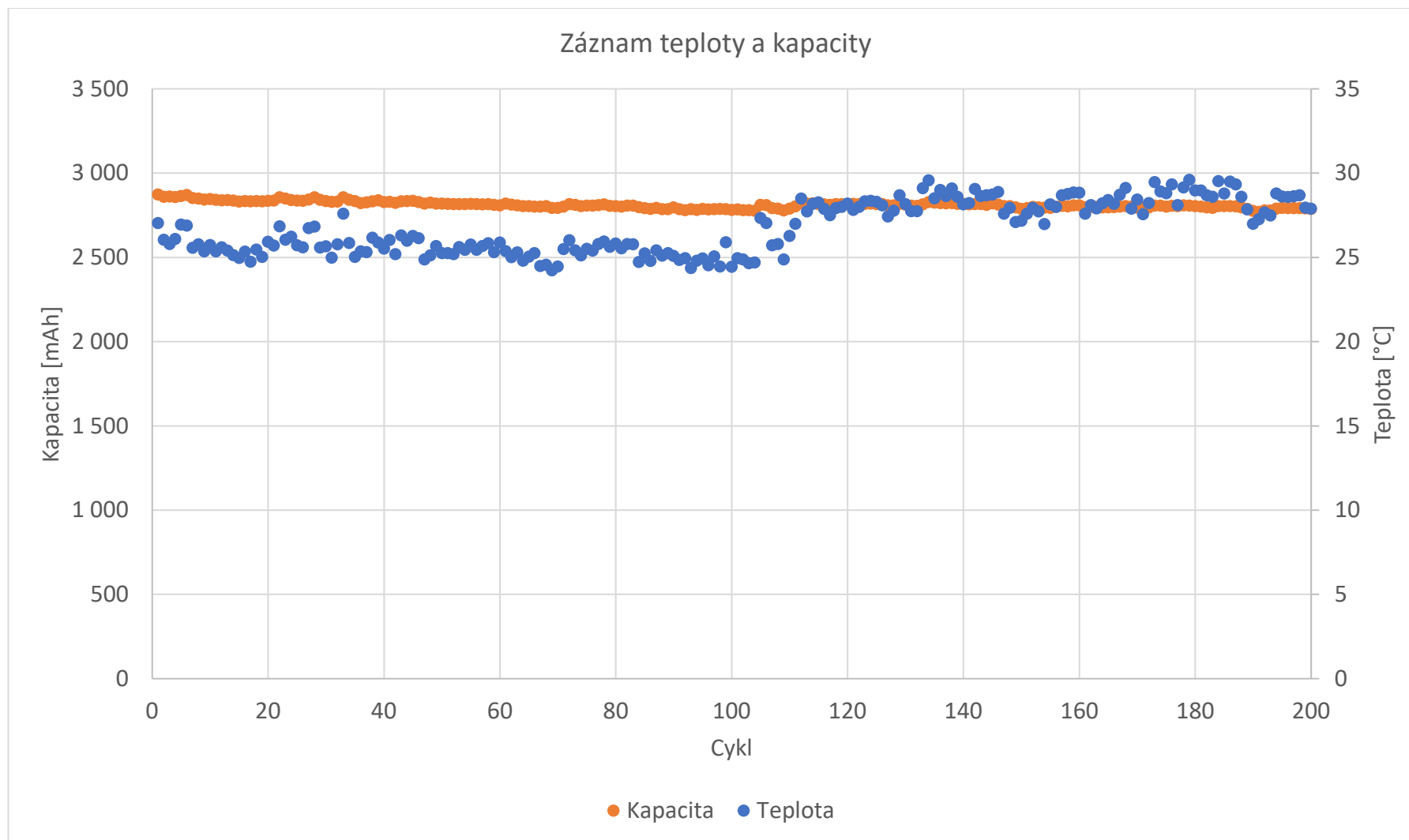
Graf 5.16 Porovnání baterií Goowei za snížené teploty



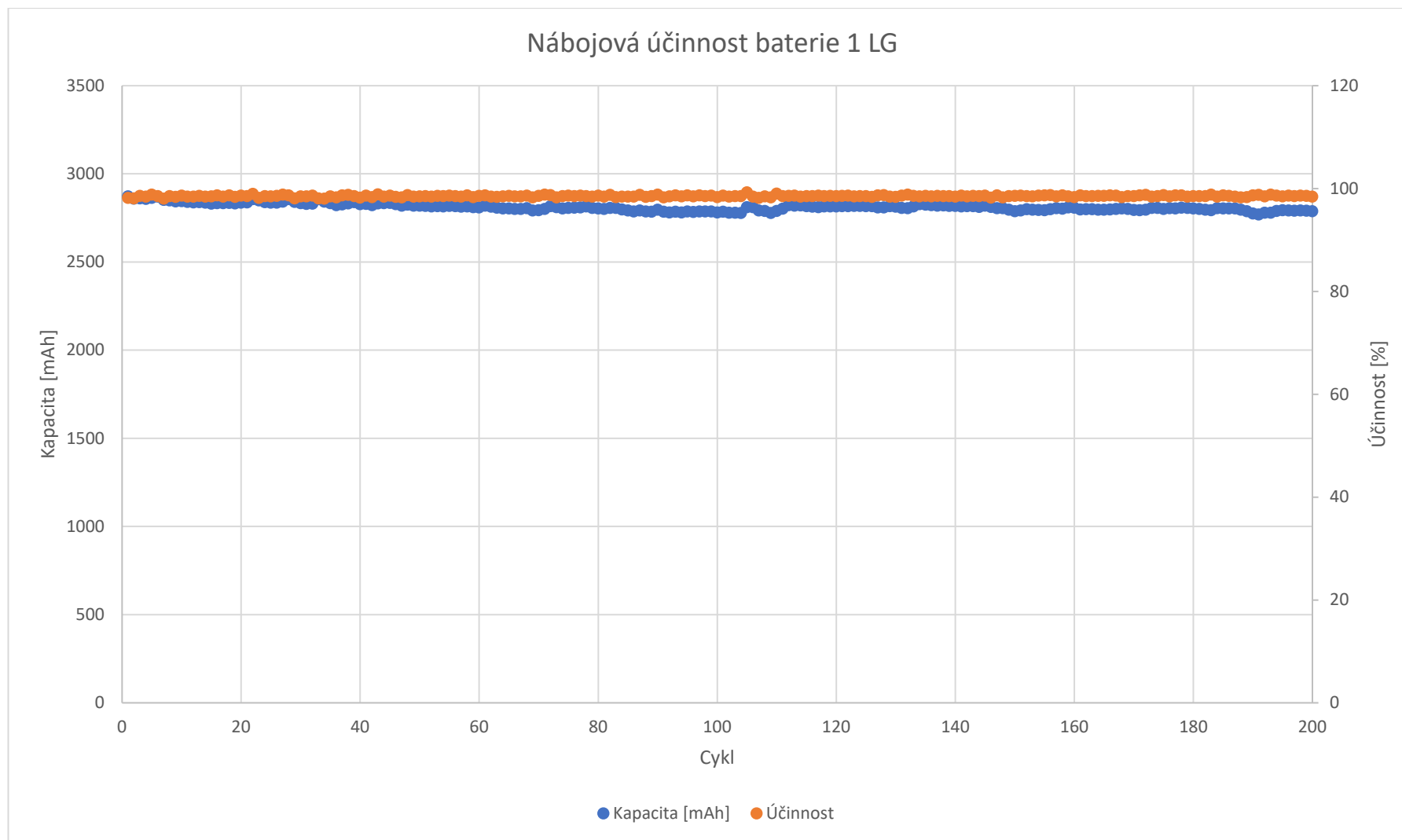
Graf 5.17 Zátěžové cyklování baterie 2 Goowei za snížené teploty



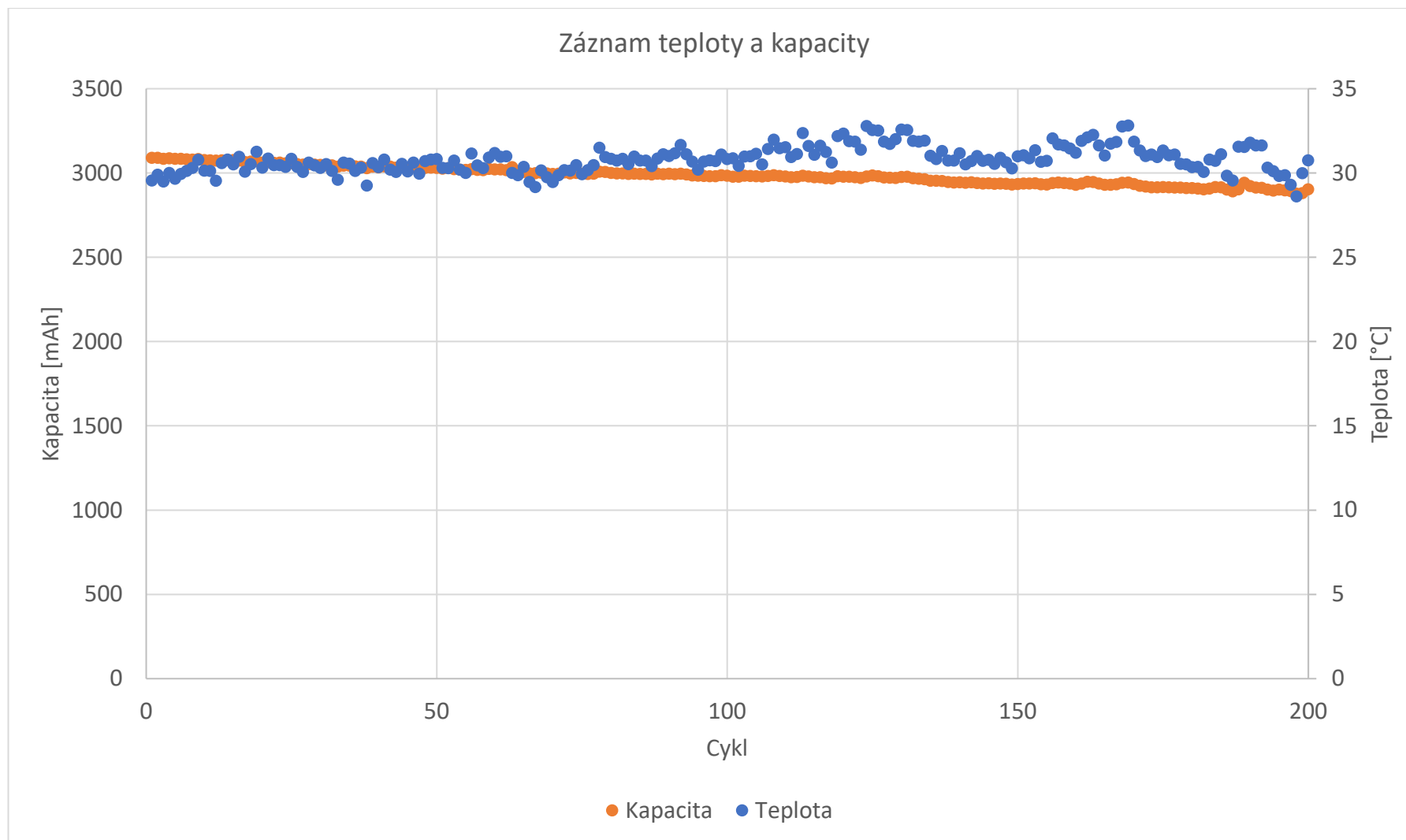
Graf 5.18 Ukázka nabíjecího cyklu (15) baterie LG za pokojové teploty



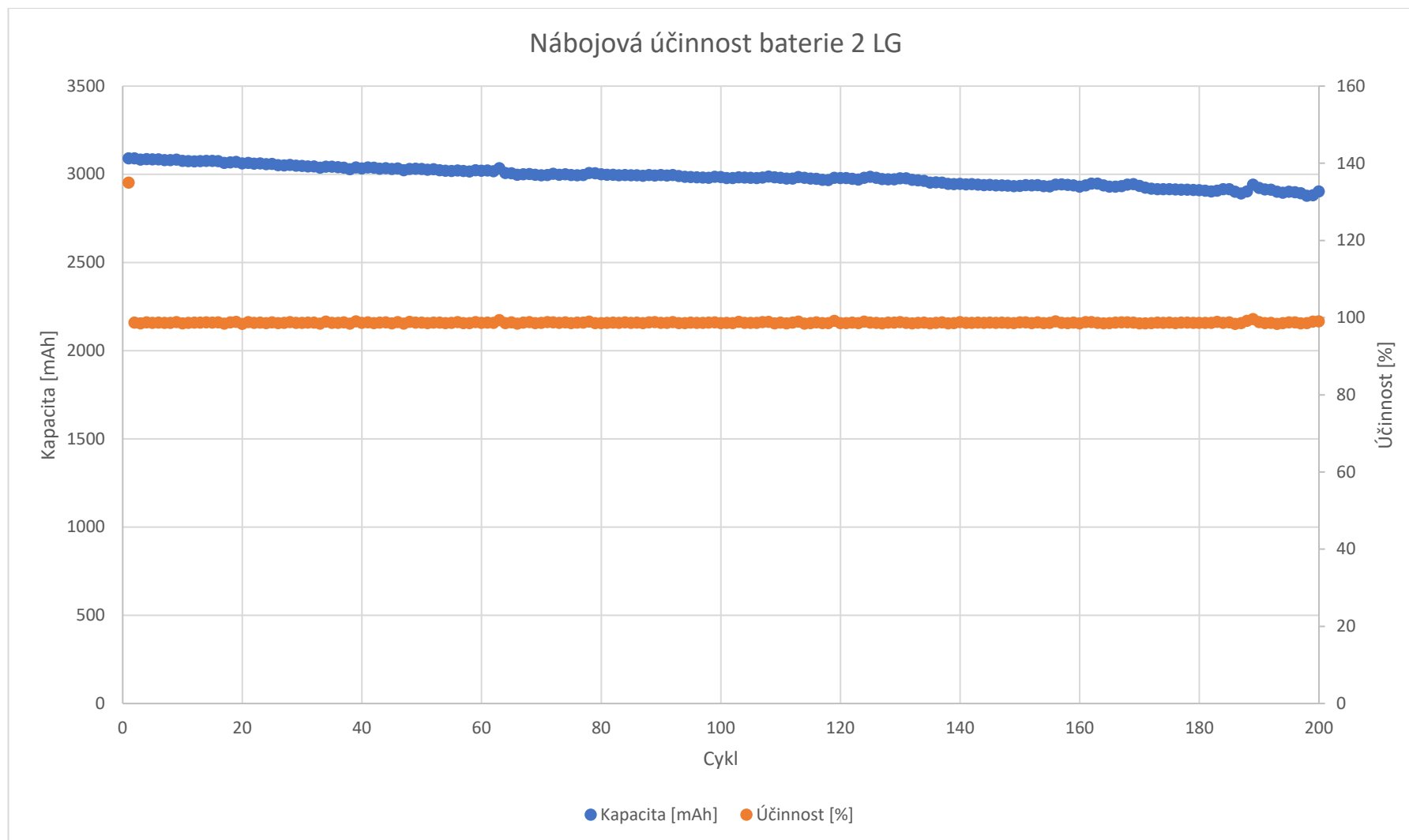
Graf 5.19 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za pokojové teploty



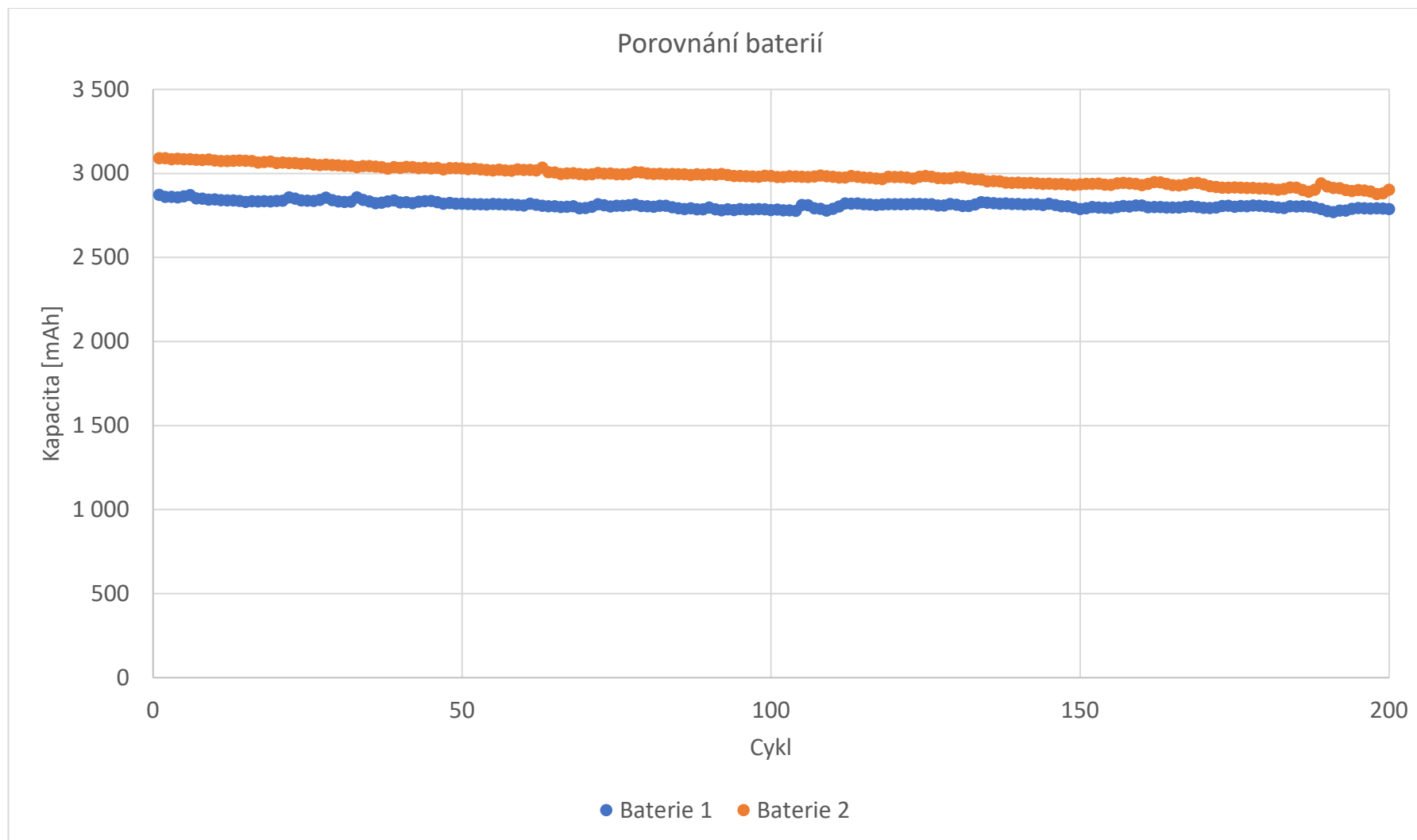
Graf 5.20 Nábojová účinnost baterie 1 LG za pokojové teploty



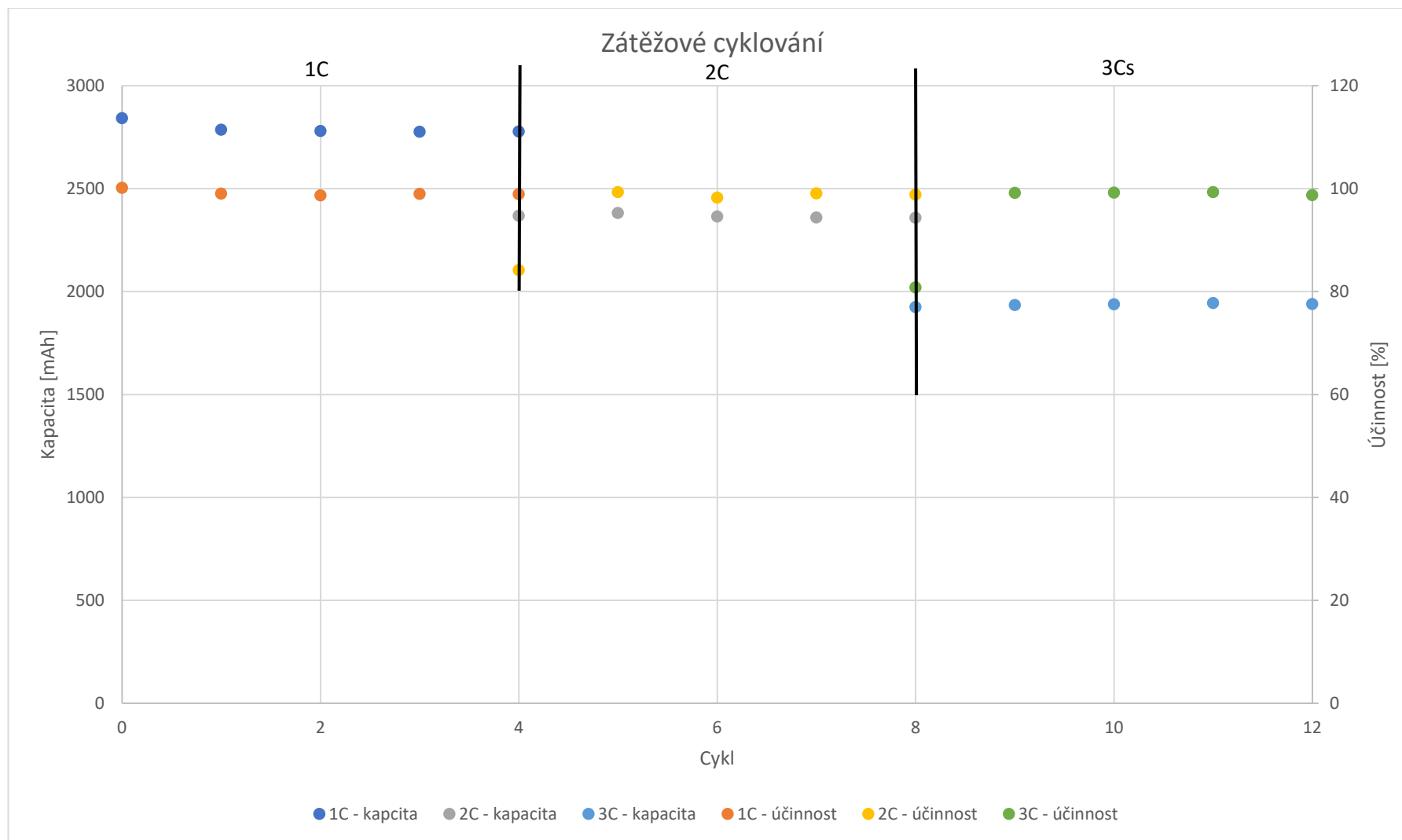
Graf 5.21 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za pokojové teploty



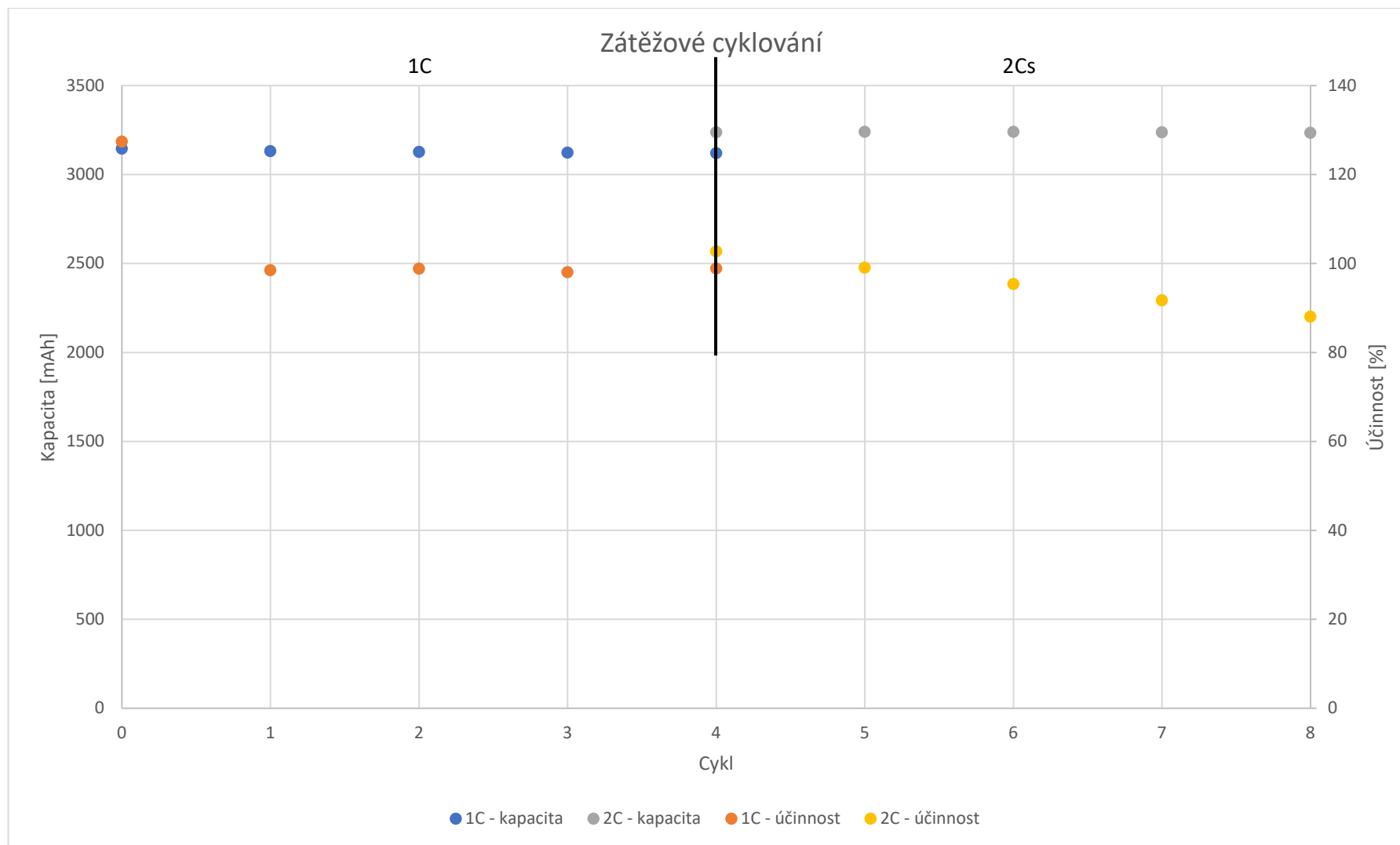
Graf 5.22 Nábojová účinnost baterie 2 LG za pokojové teploty



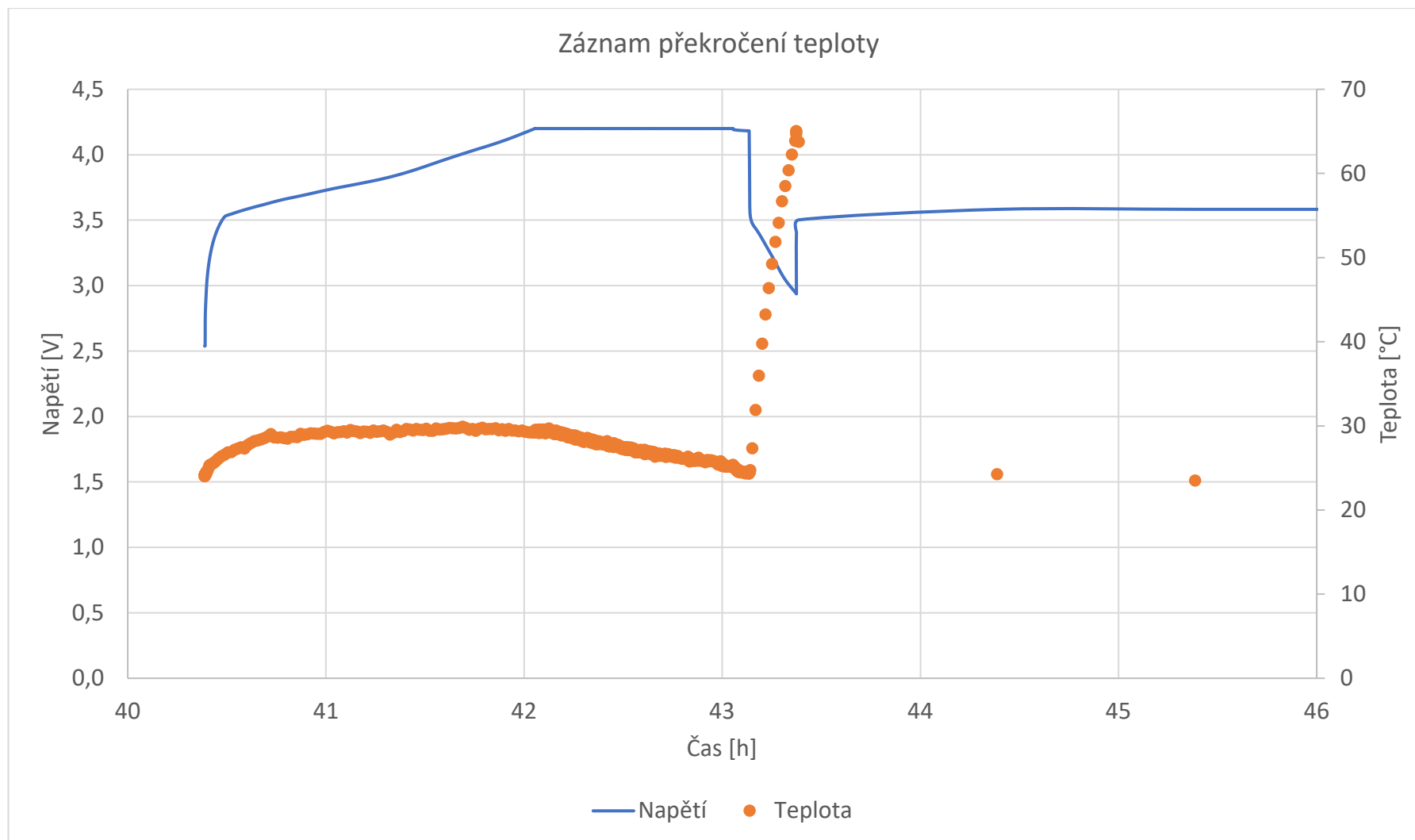
Graf 5.23 Porovnání baterií LG za pokojové teploty



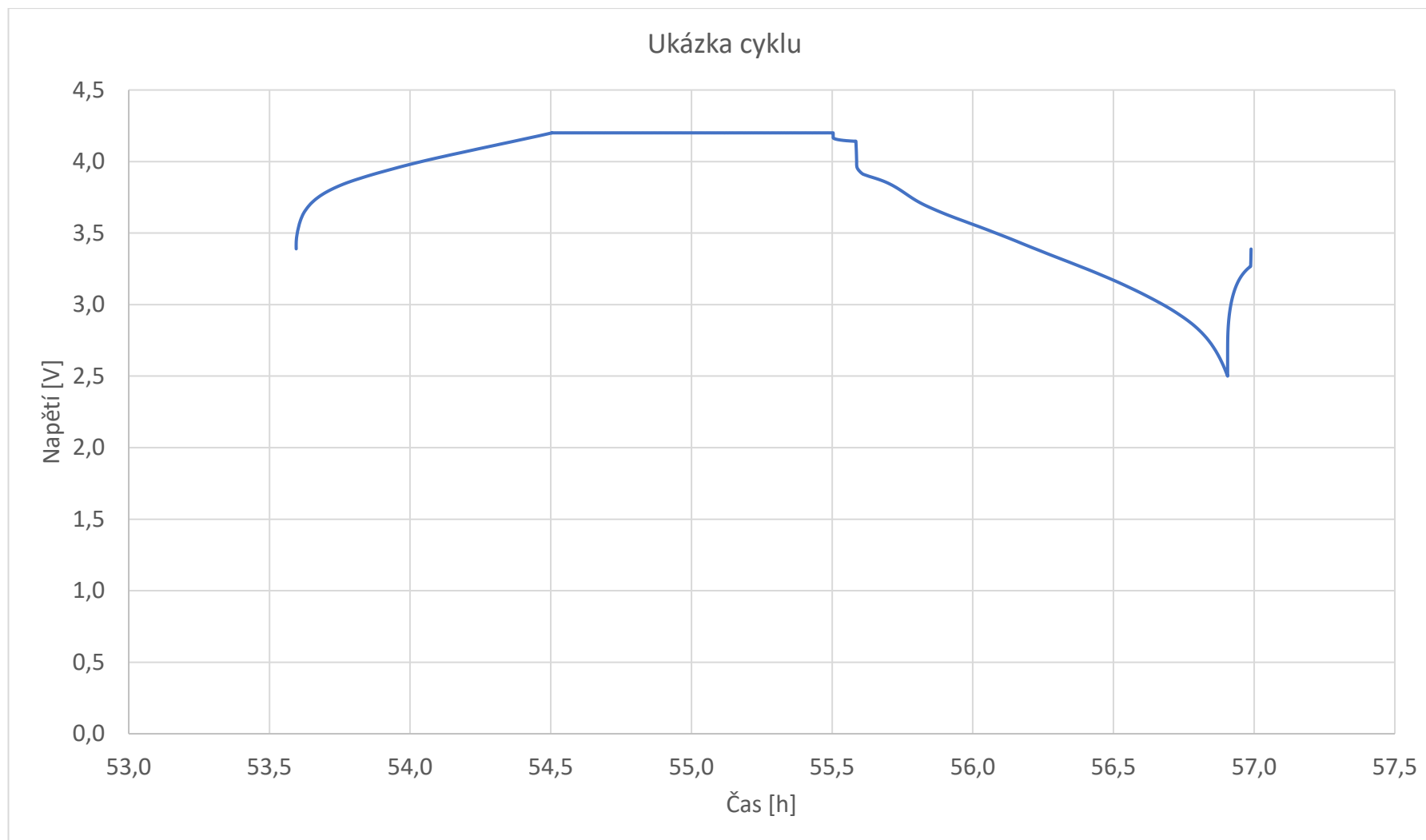
Graf 5.24 Zátěžové cyklování baterie 1 LG za pokojové teploty



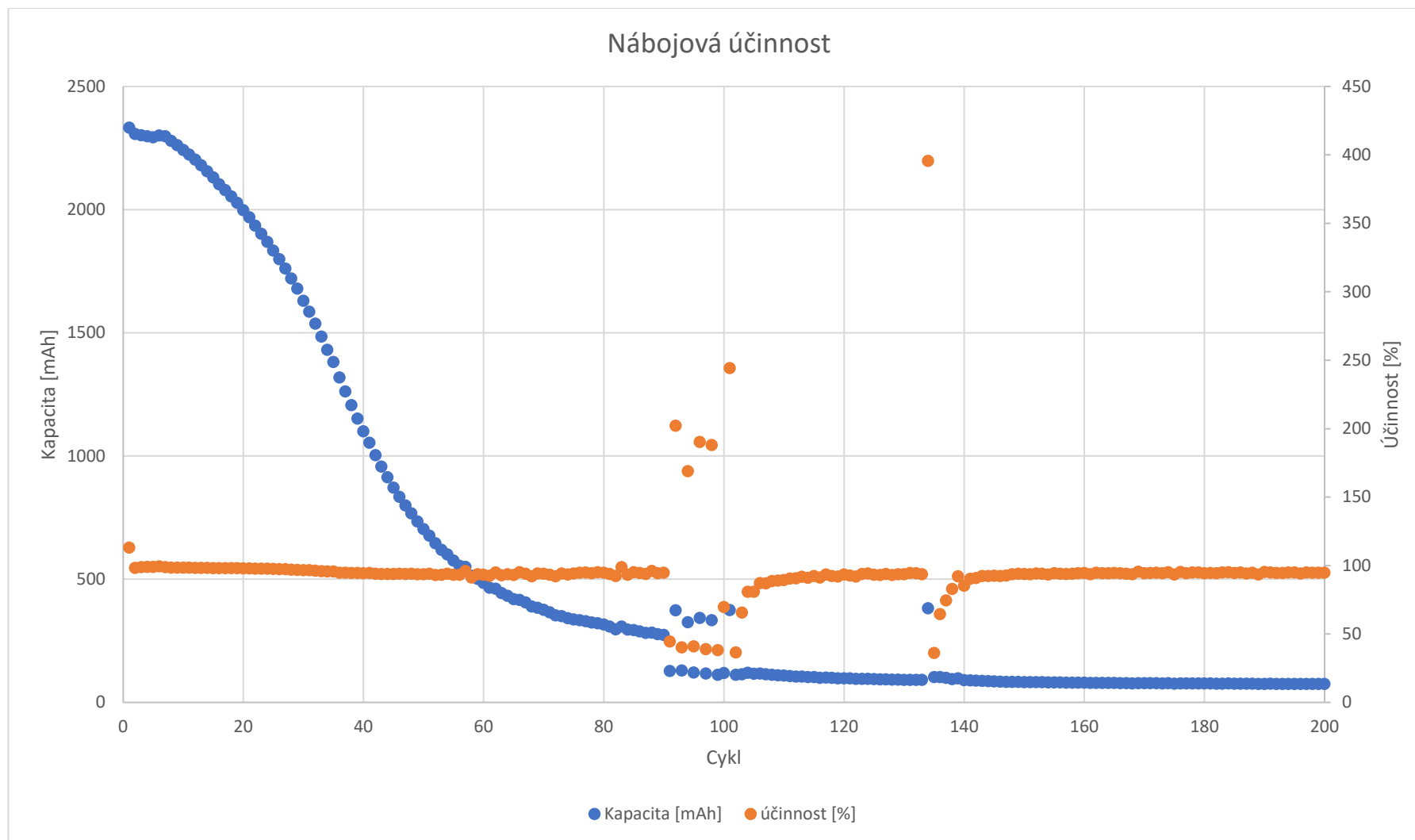
Graf 5.25 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za pokojové teploty



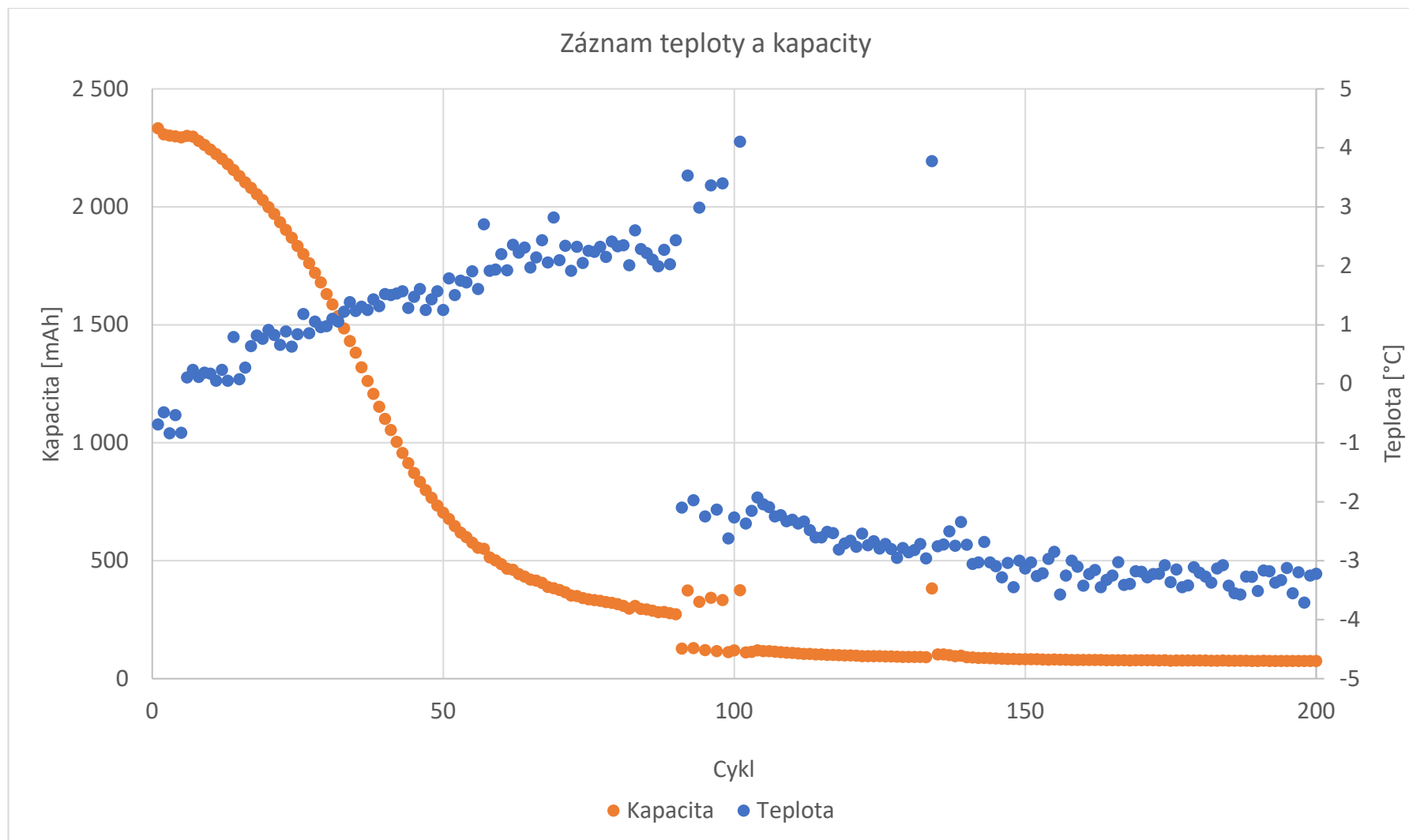
Graf 5.26 Překročení teploty při zátěžovém cyklování 3C baterie LG



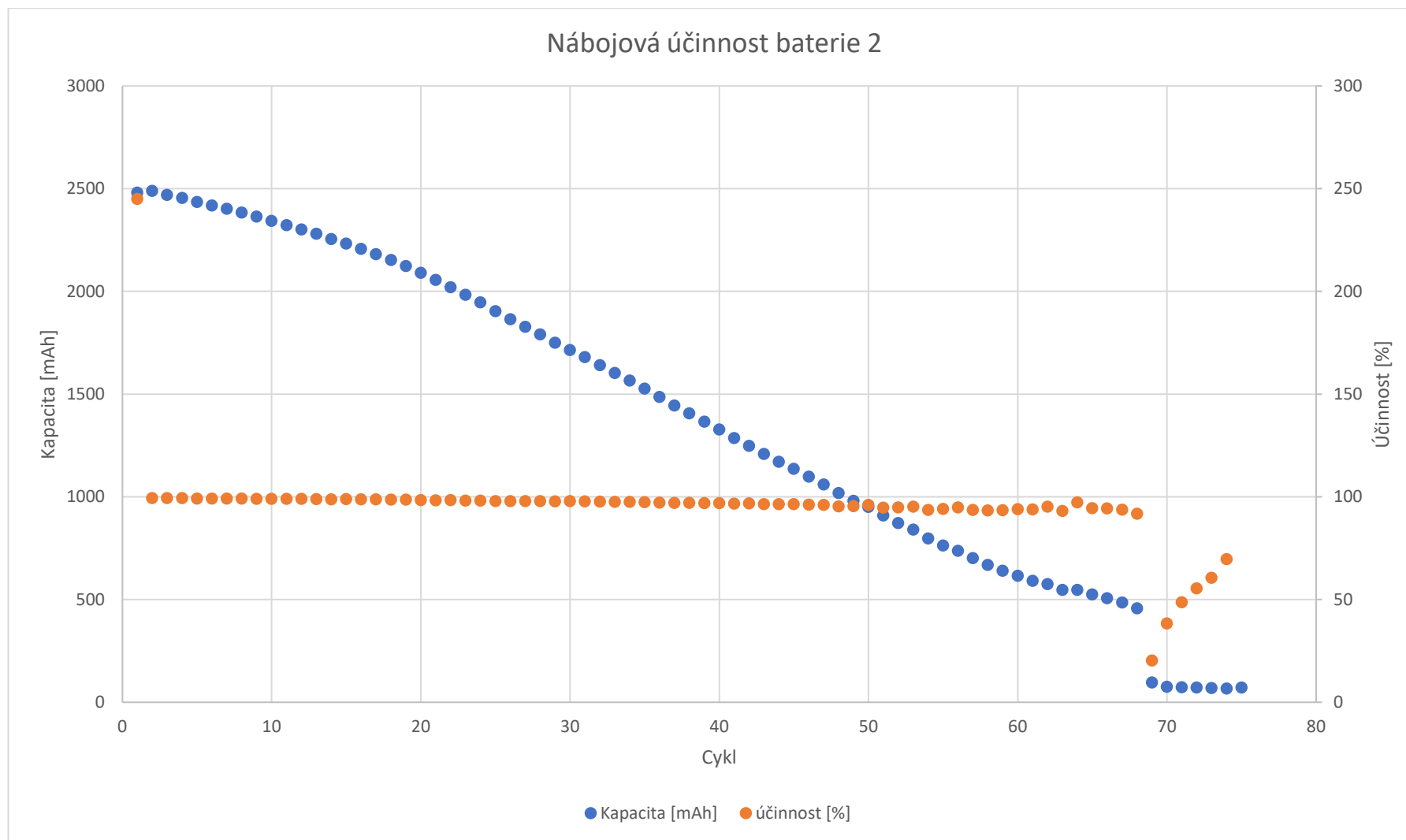
Graf 5.27 Ukázka cyklu (15) baterie LG za snížené teploty



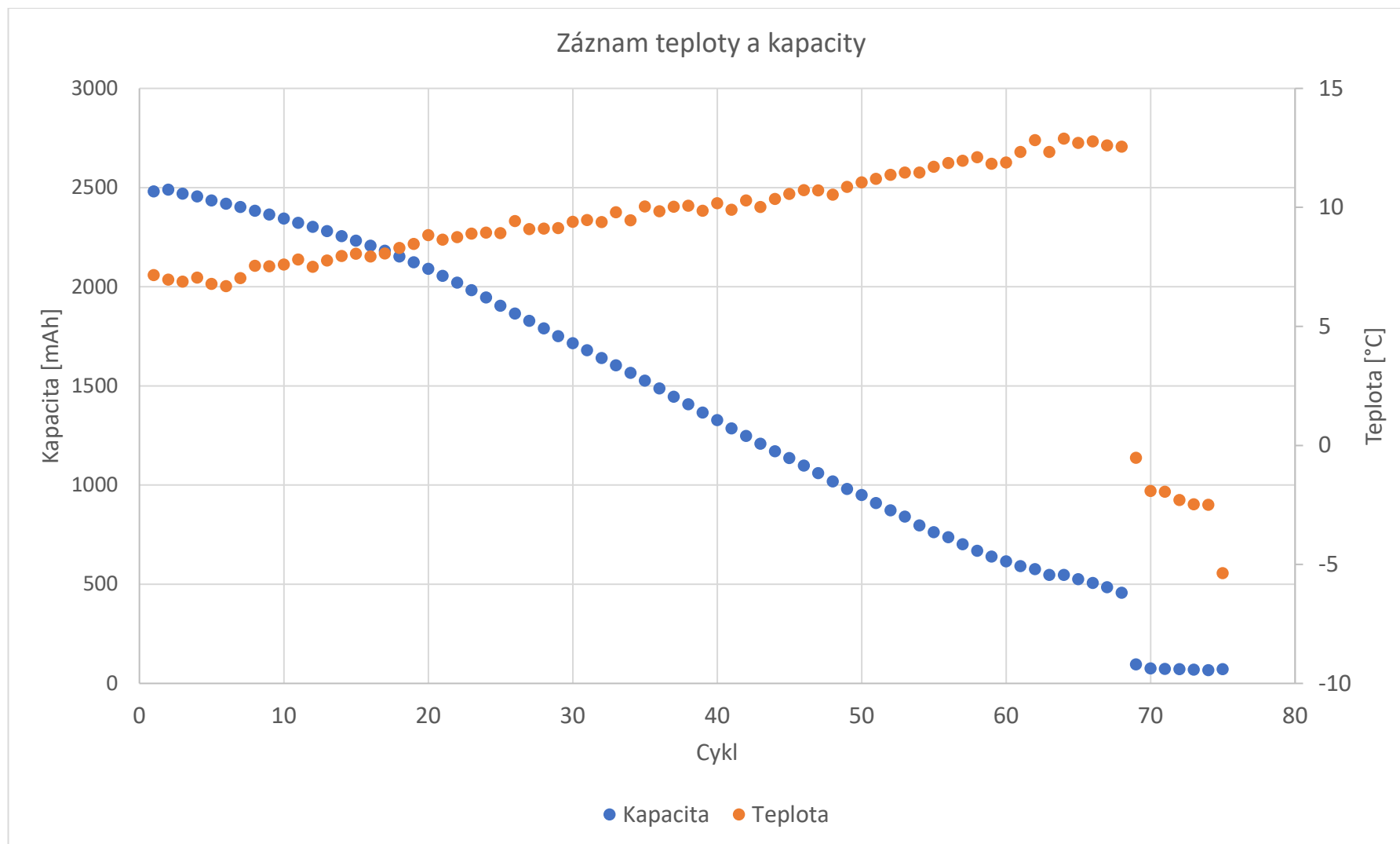
Graf 5.28 Nábojová účinnost baterie 1 LG za snížené teploty



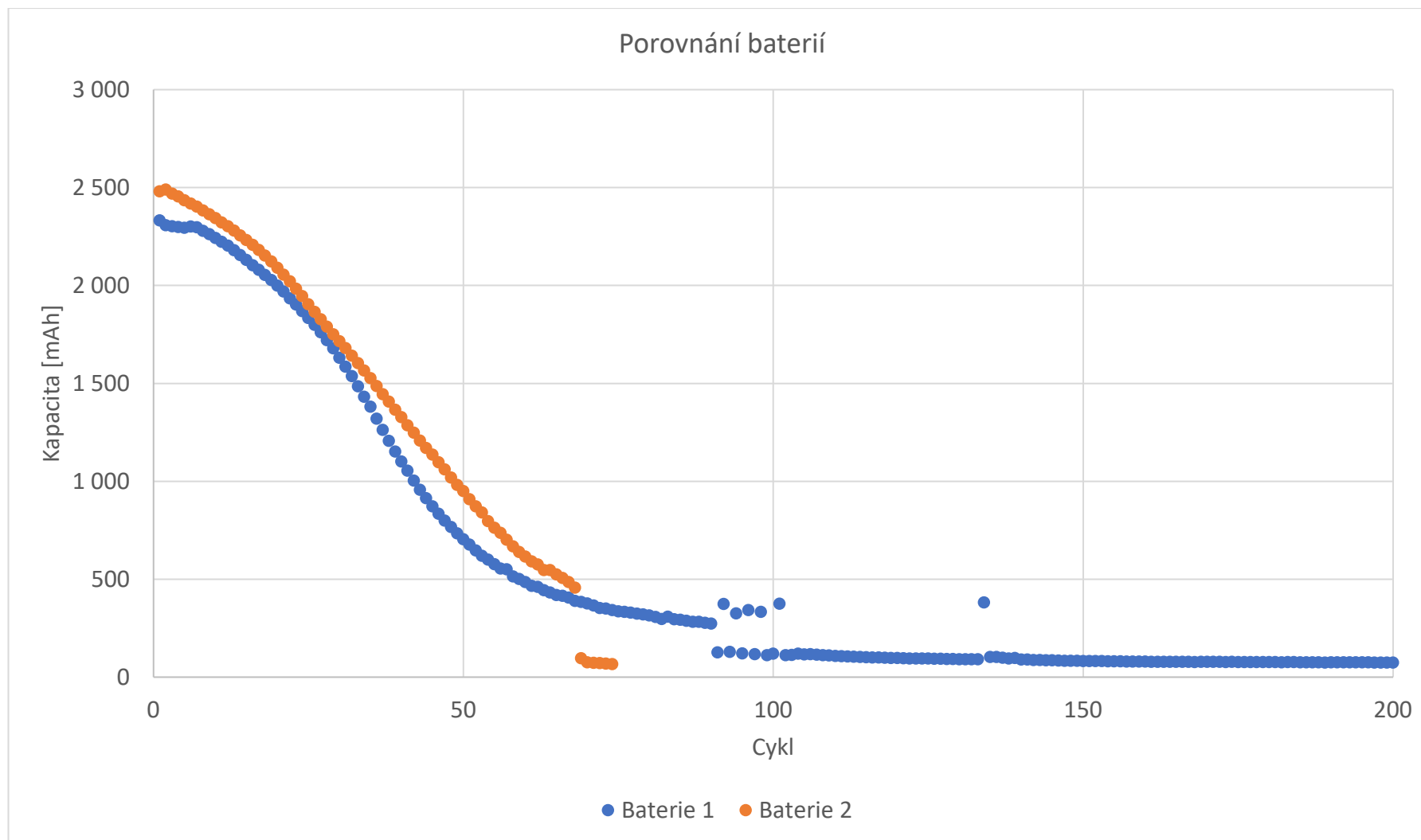
Graf 5.29 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LG za snížené teploty



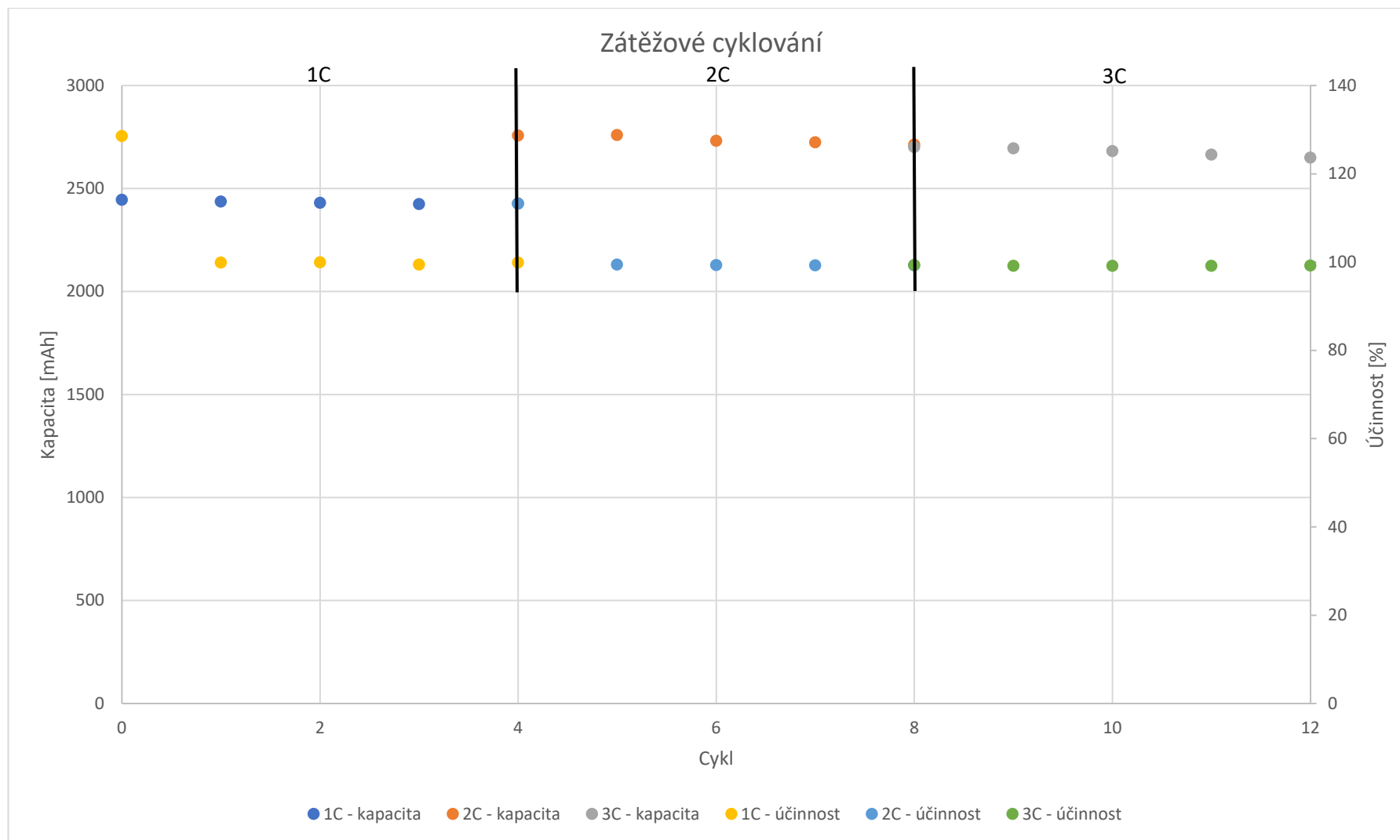
Graf 5.30 Nábojová účinnost baterie 2 LG za snížené teploty



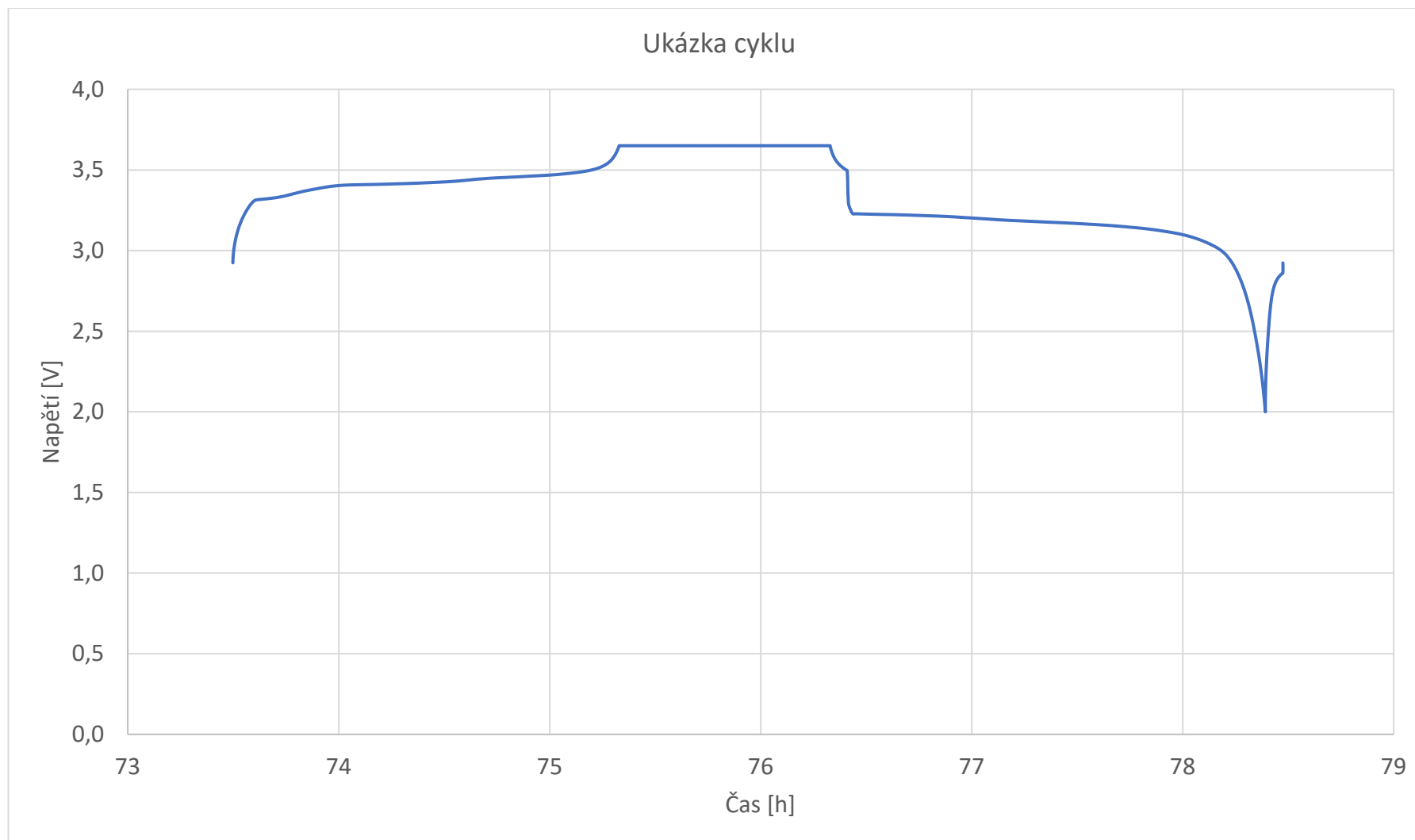
Graf 5.31 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LG za snížené teploty



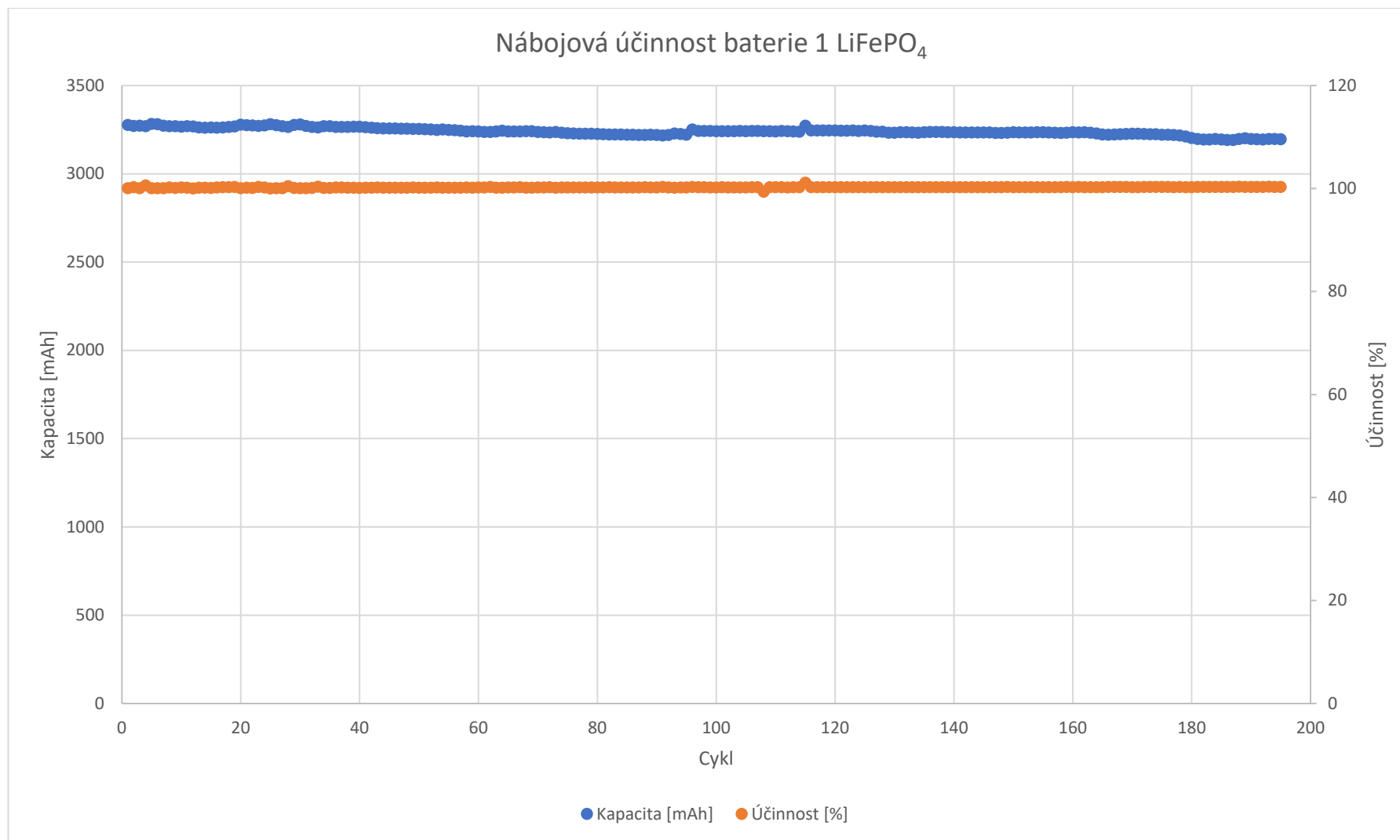
Graf 5.32 Porovnání baterií LG za snížené teploty



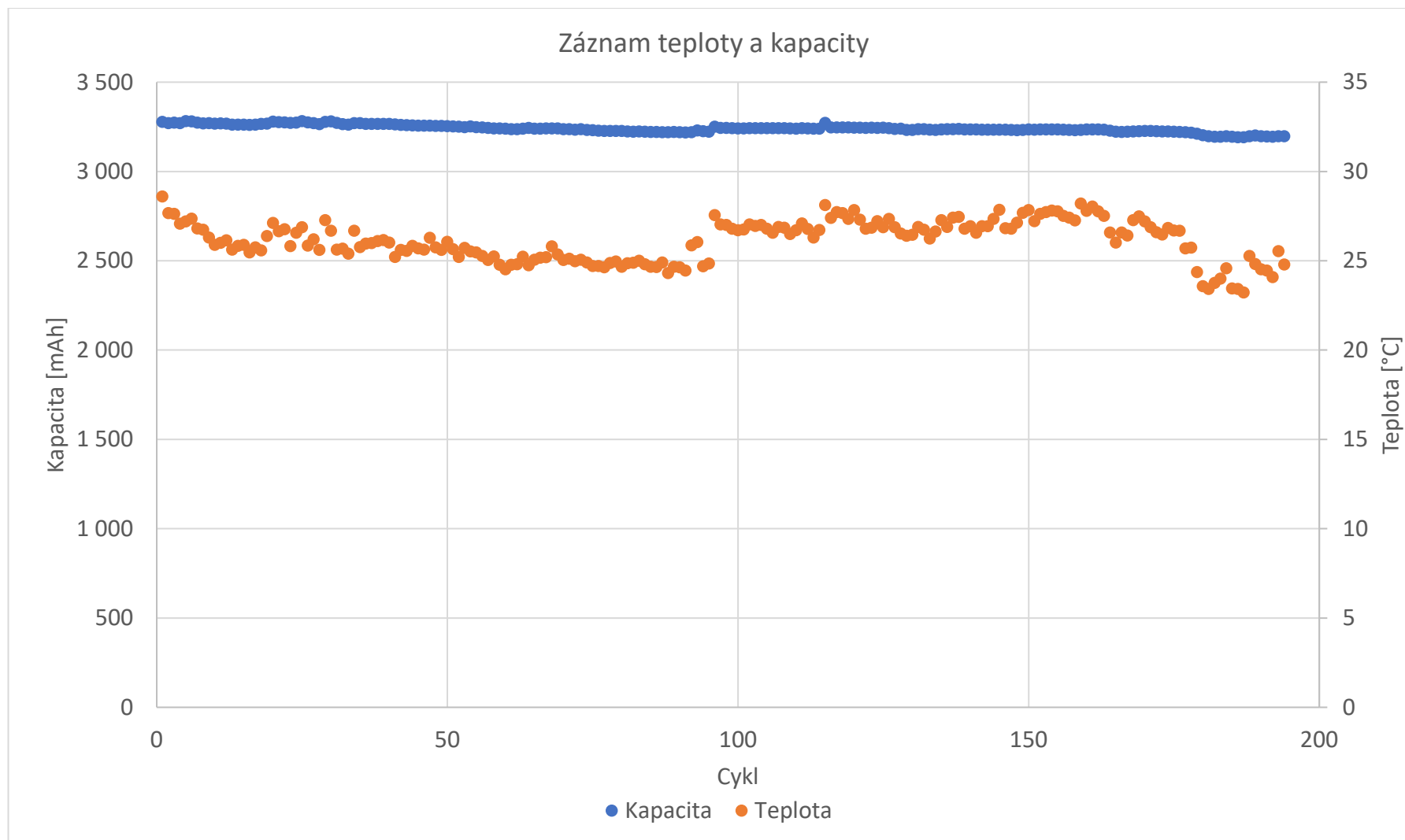
Graf 5.33 Zátěžové cyklování baterie 2 LG za snížené teploty



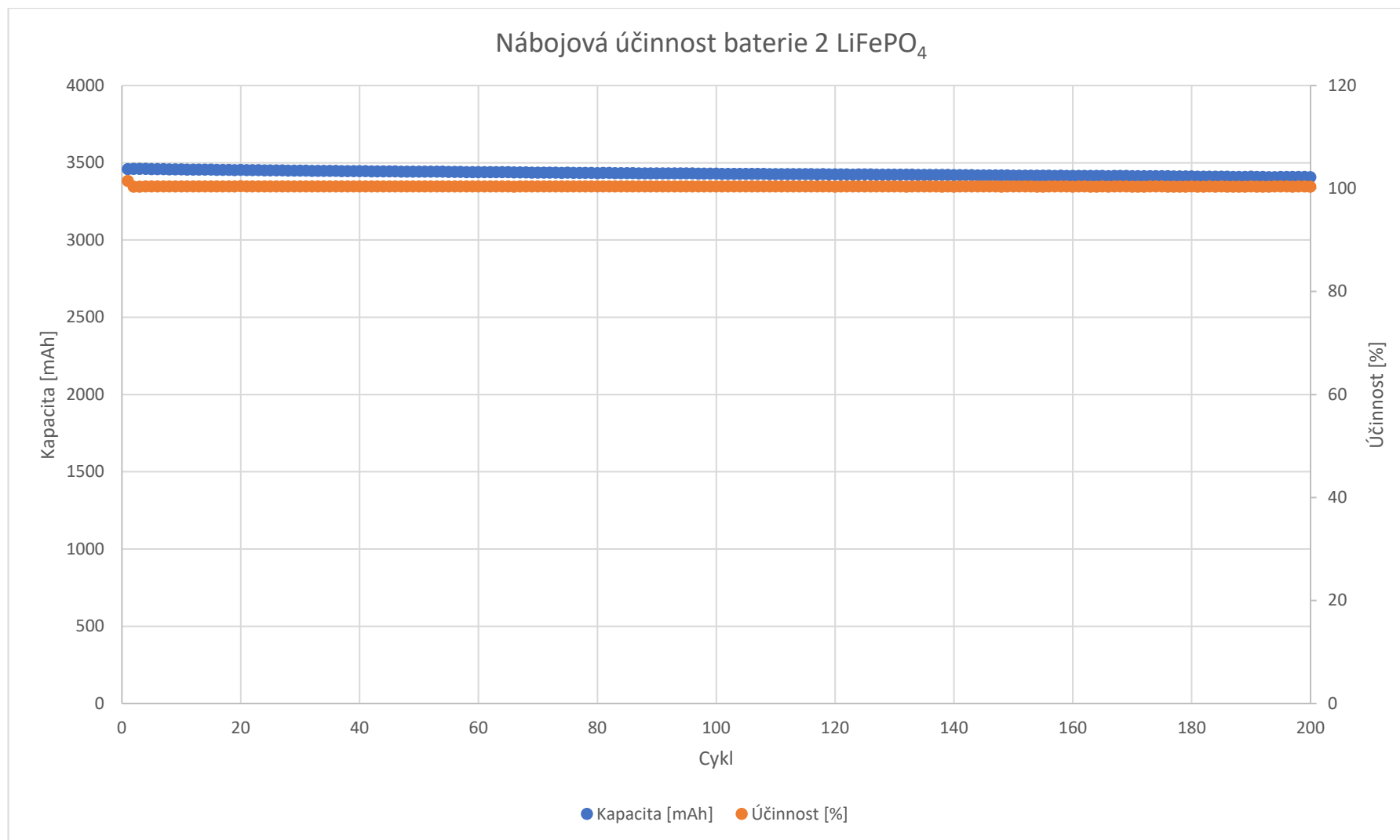
Graf 5.34 Ukázka cyklu (15) baterie LiFePO₄ za pokojové teploty



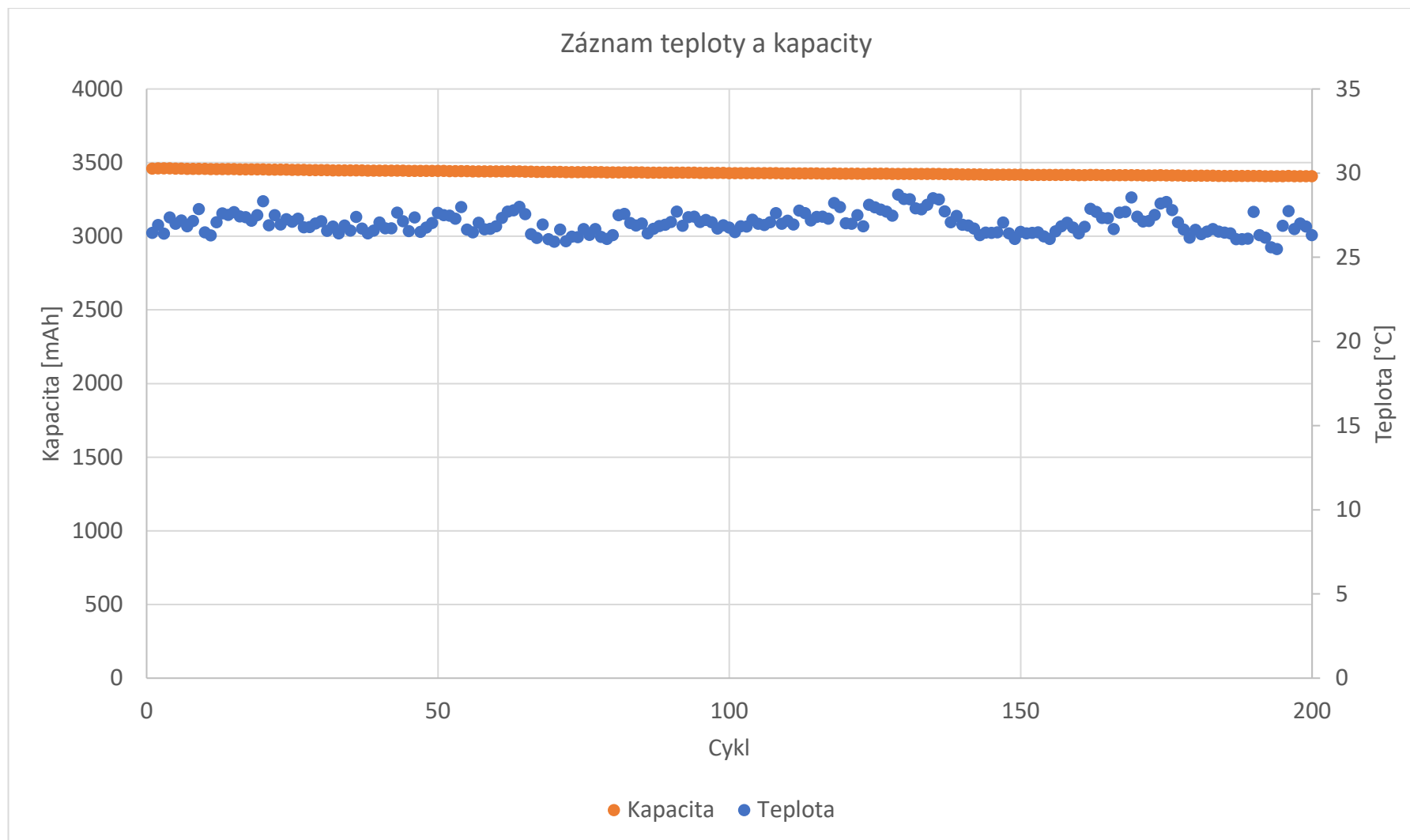
Graf 5.35 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO₄ za pokojové teploty



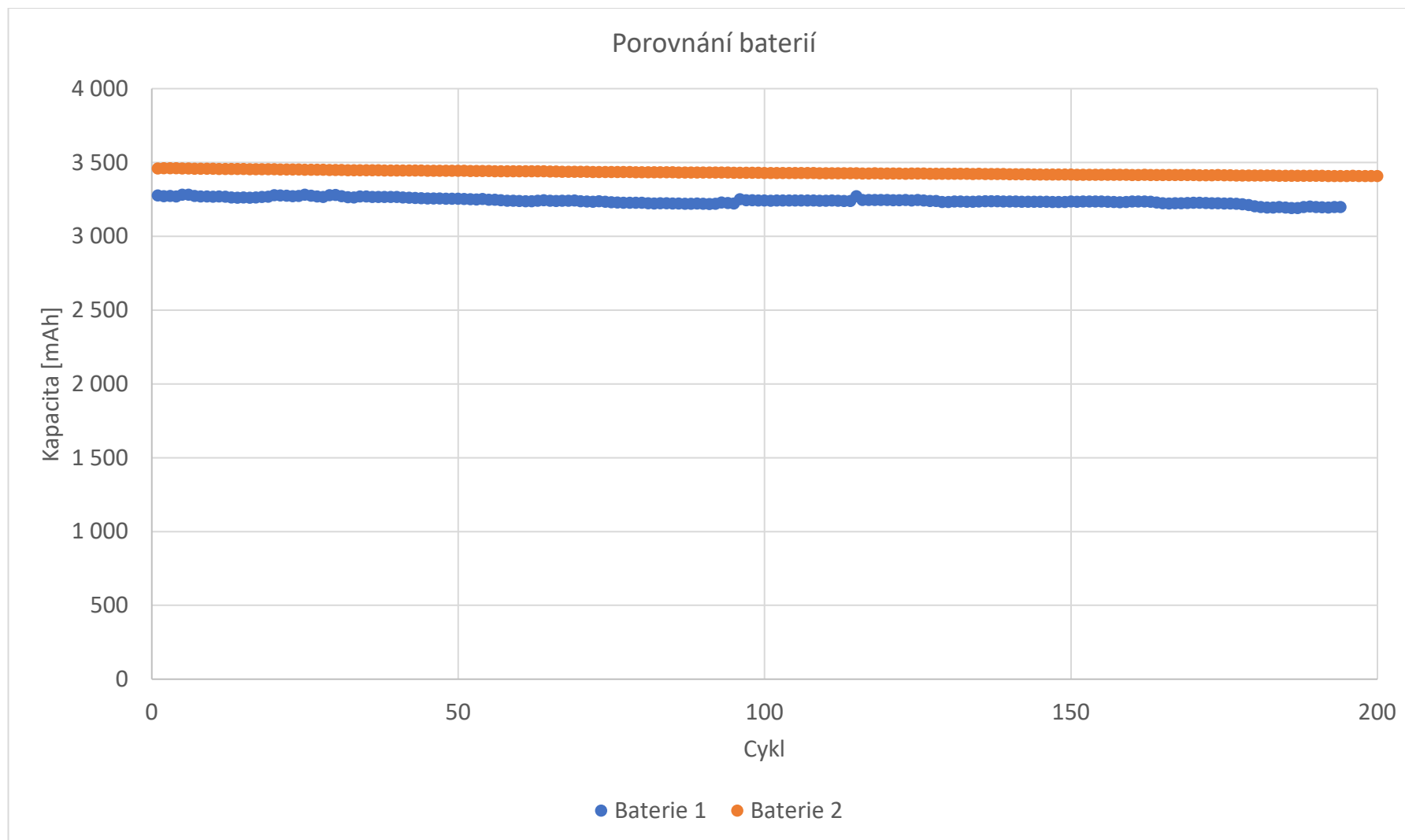
Graf 5.36 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO₄ za pokojové teploty



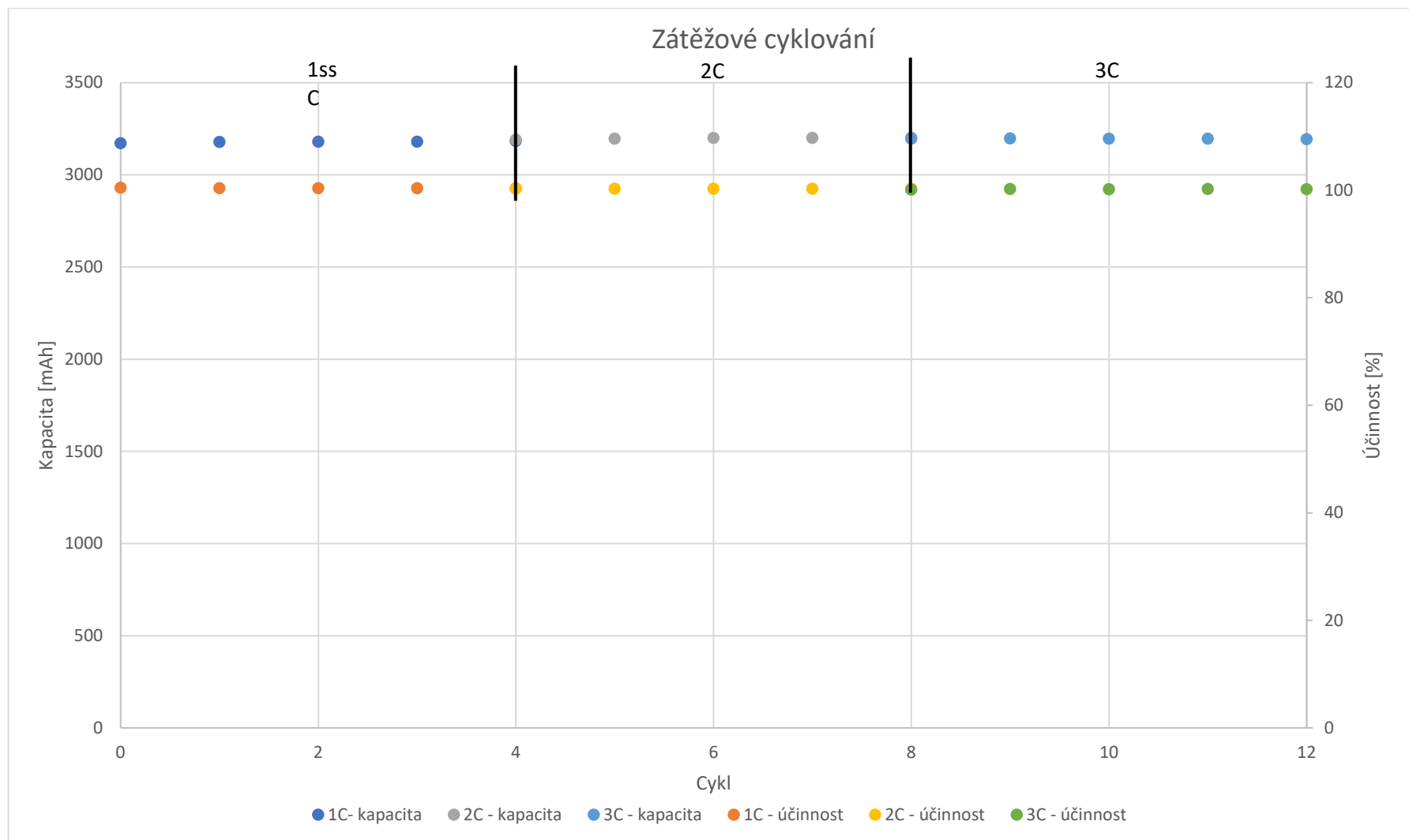
Graf 5.37 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO₄ za pokojové teploty



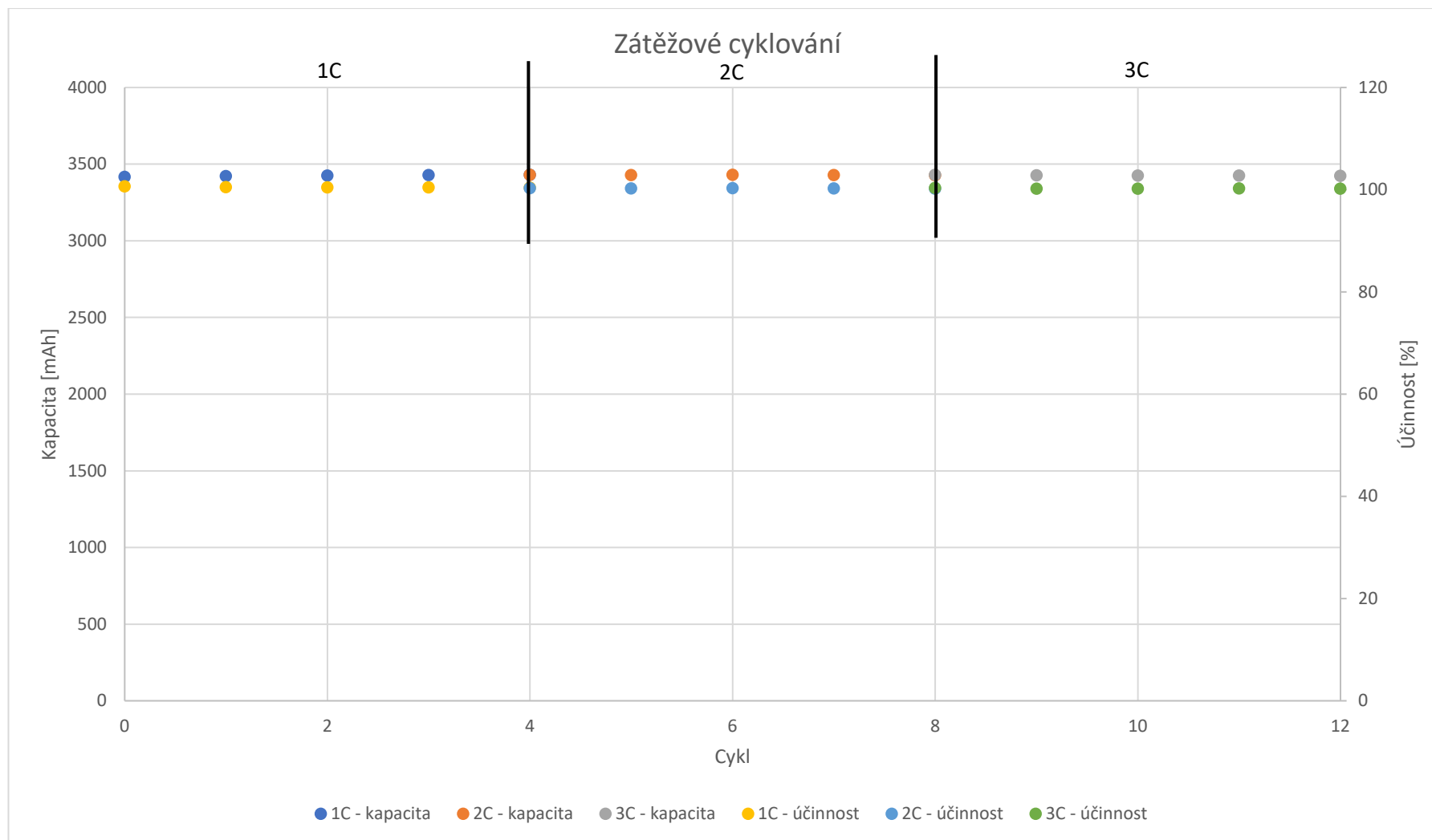
Graf 5.38 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO₄ za pokojové teploty



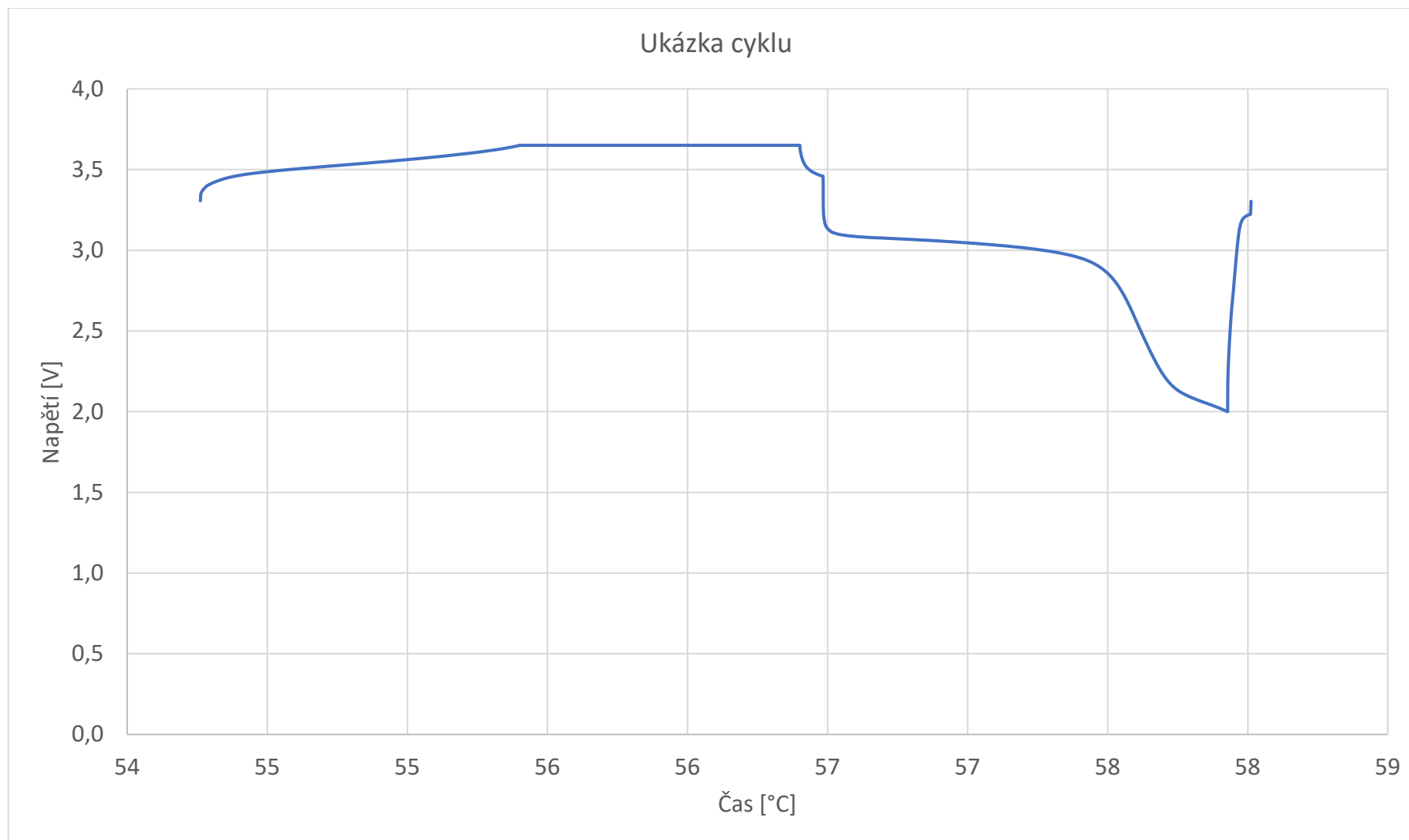
Graf 5.39 Porovnání baterií LiFePO₄ za pokojové teploty



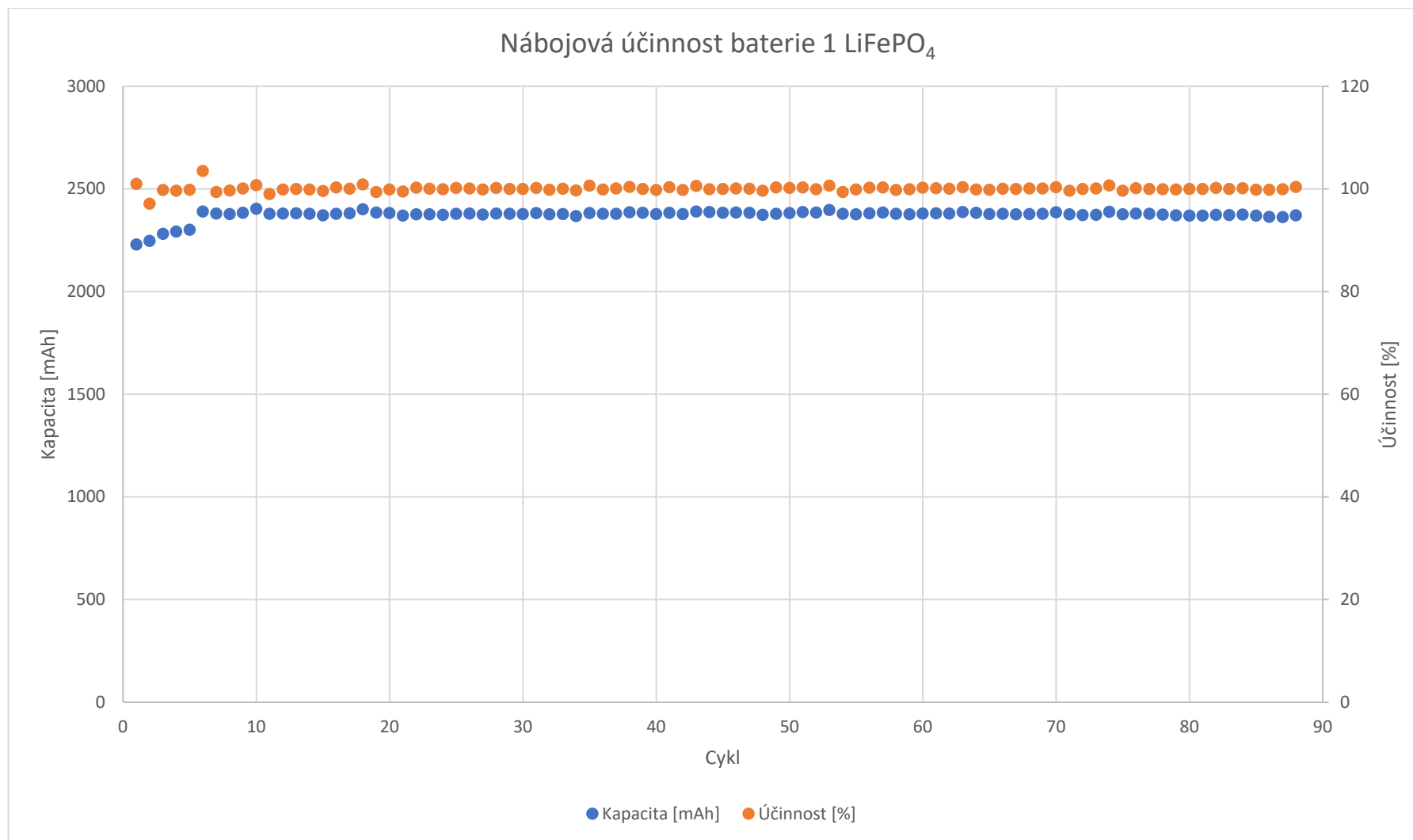
Graf 5.40 Zátěžové cyklování baterie 1 LiFePO₄ za pokojové teploty



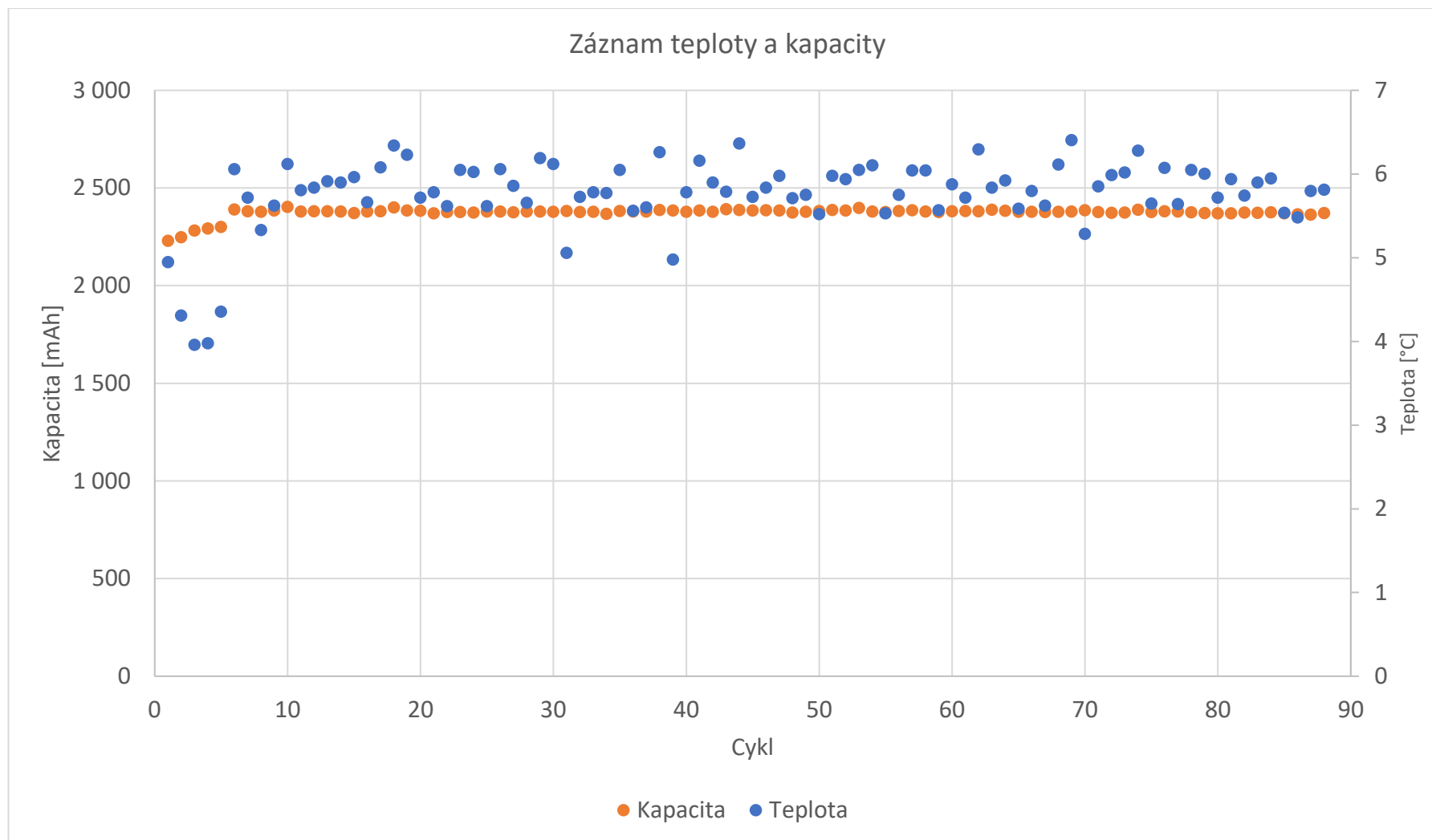
Graf 5.41 Zátěžové cyklování baterie 2 LiFePO₄ za pokojové teploty



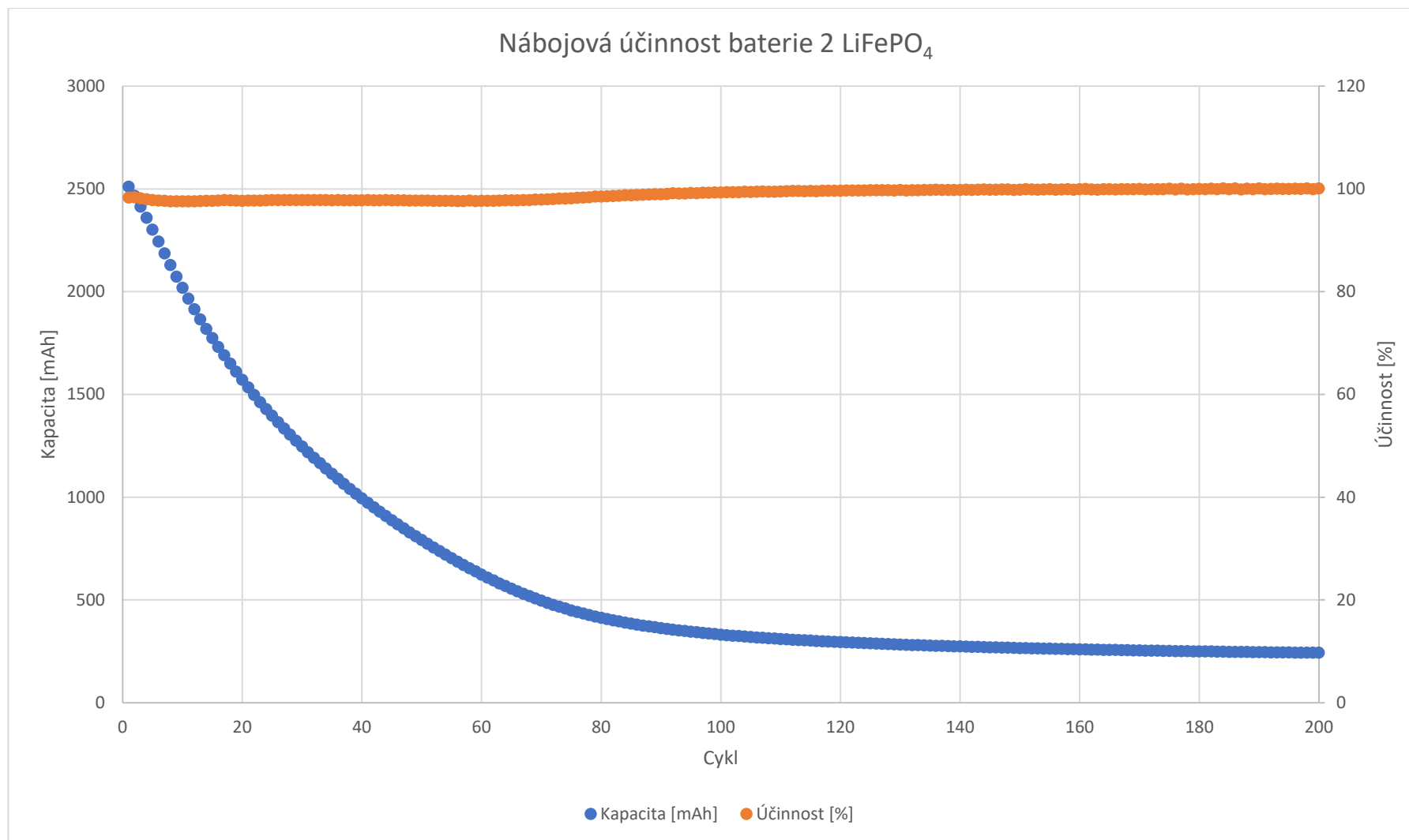
Graf 5.42 Ukázka cyklu (15) baterie LiFePO₄ za snížené teploty



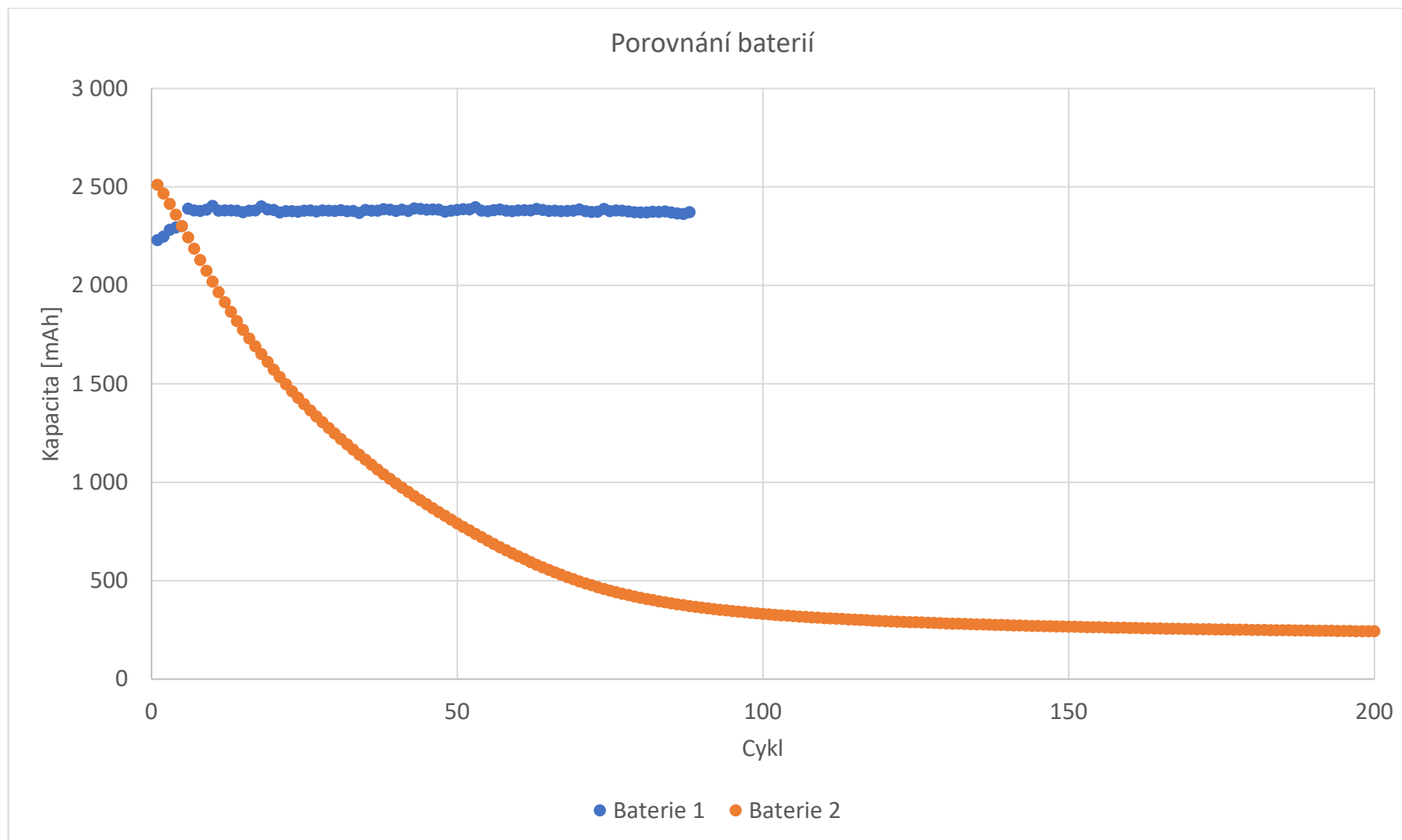
Graf 5.43 Nábojová účinnost baterie 1 LiFePO₄ za snížené teploty



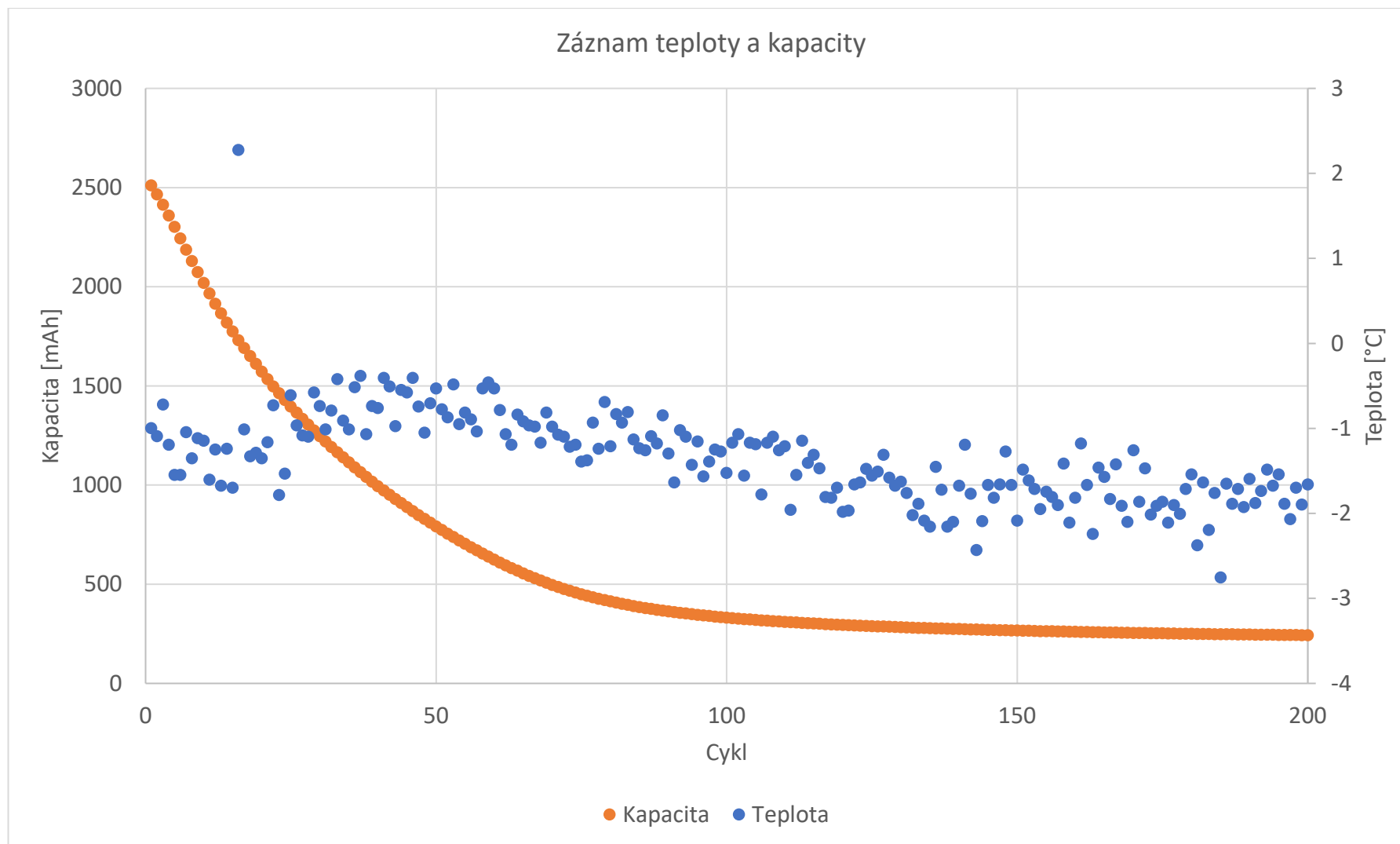
Graf 5.44 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LiFePO₄ za snížené teploty



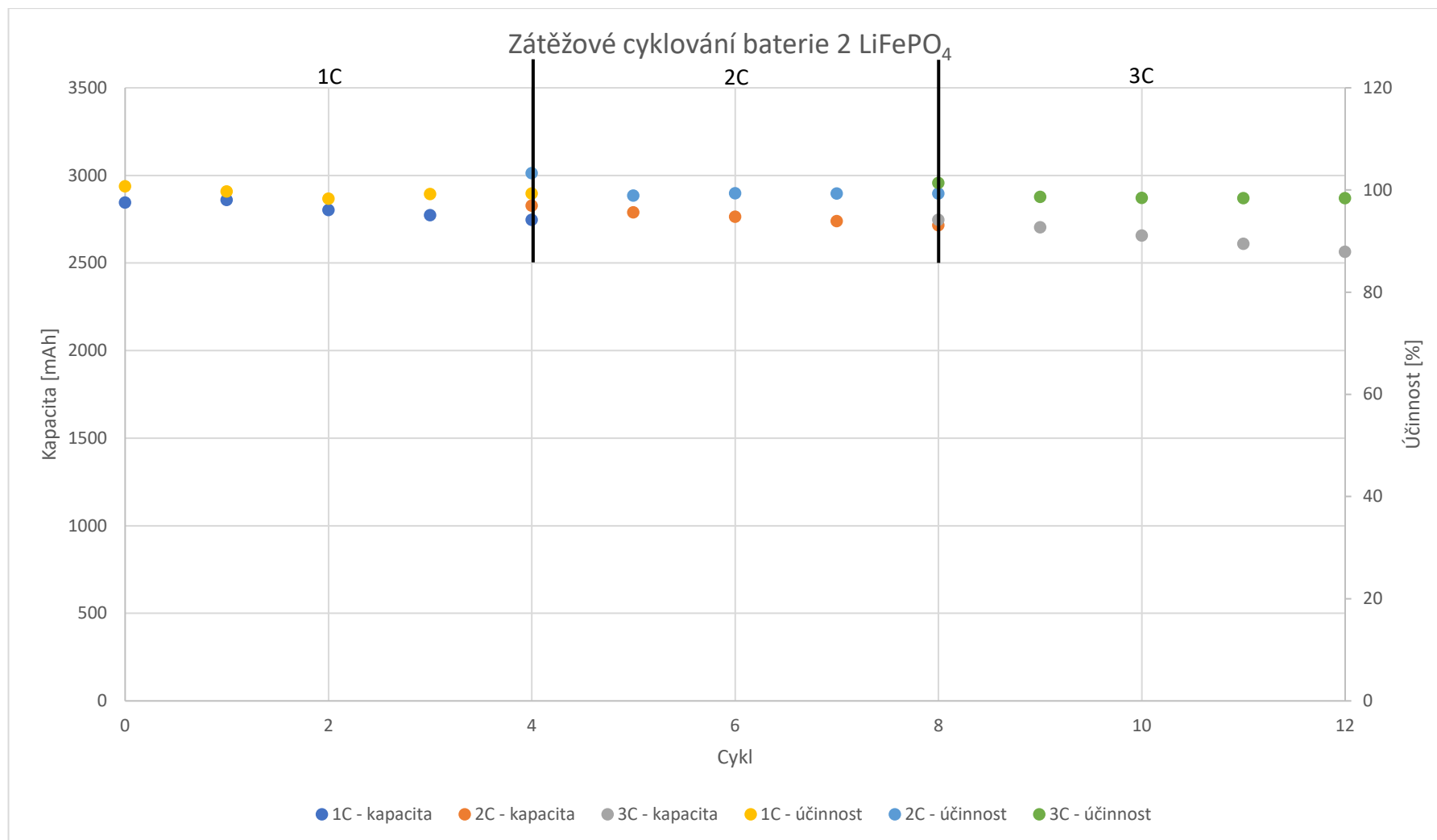
Graf 5.45 Nábojová účinnost baterie 2 LiFePO₄ za snížené teploty



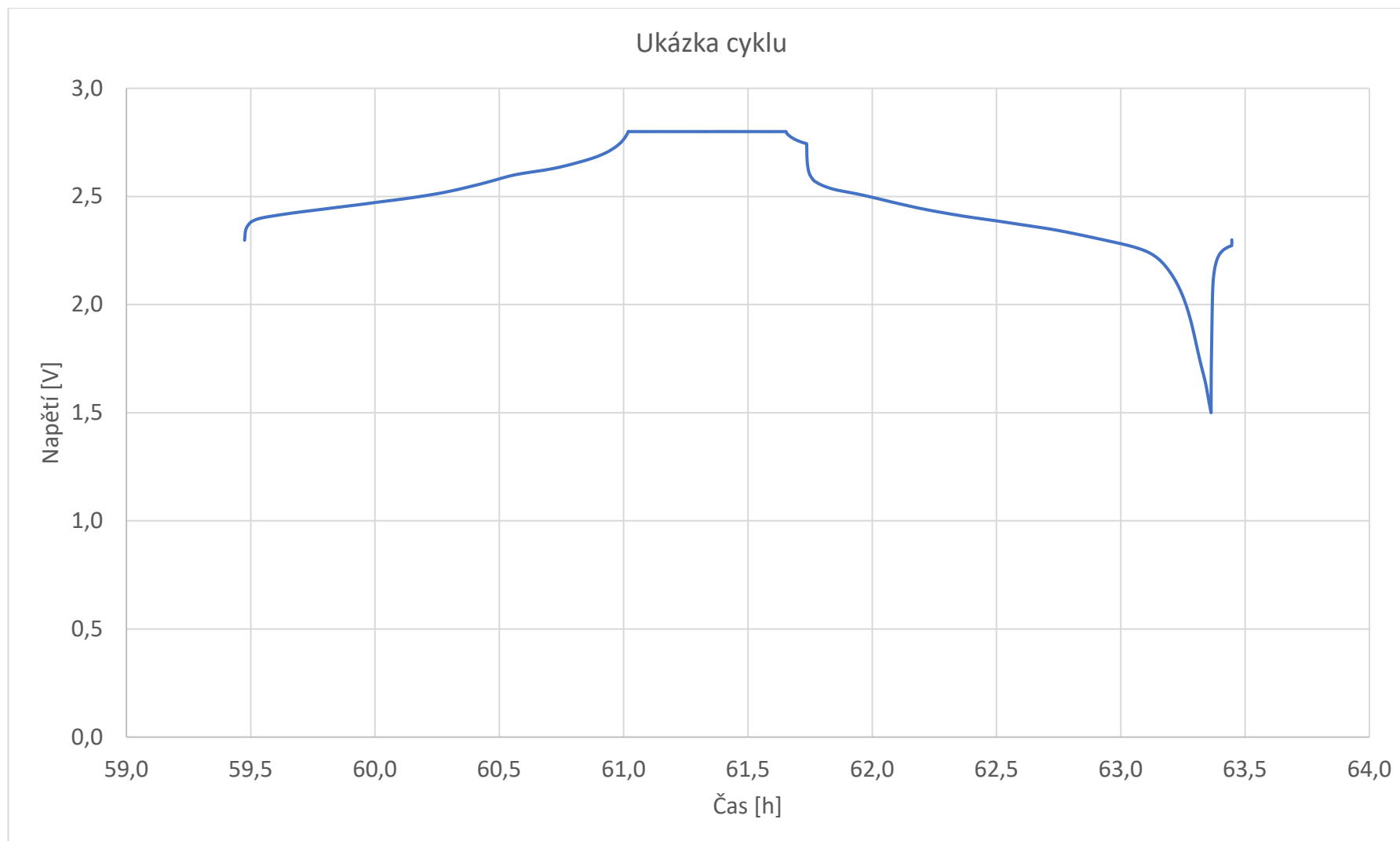
Graf 5.46 Porovnání baterií LiFePO₄ za snížené teploty



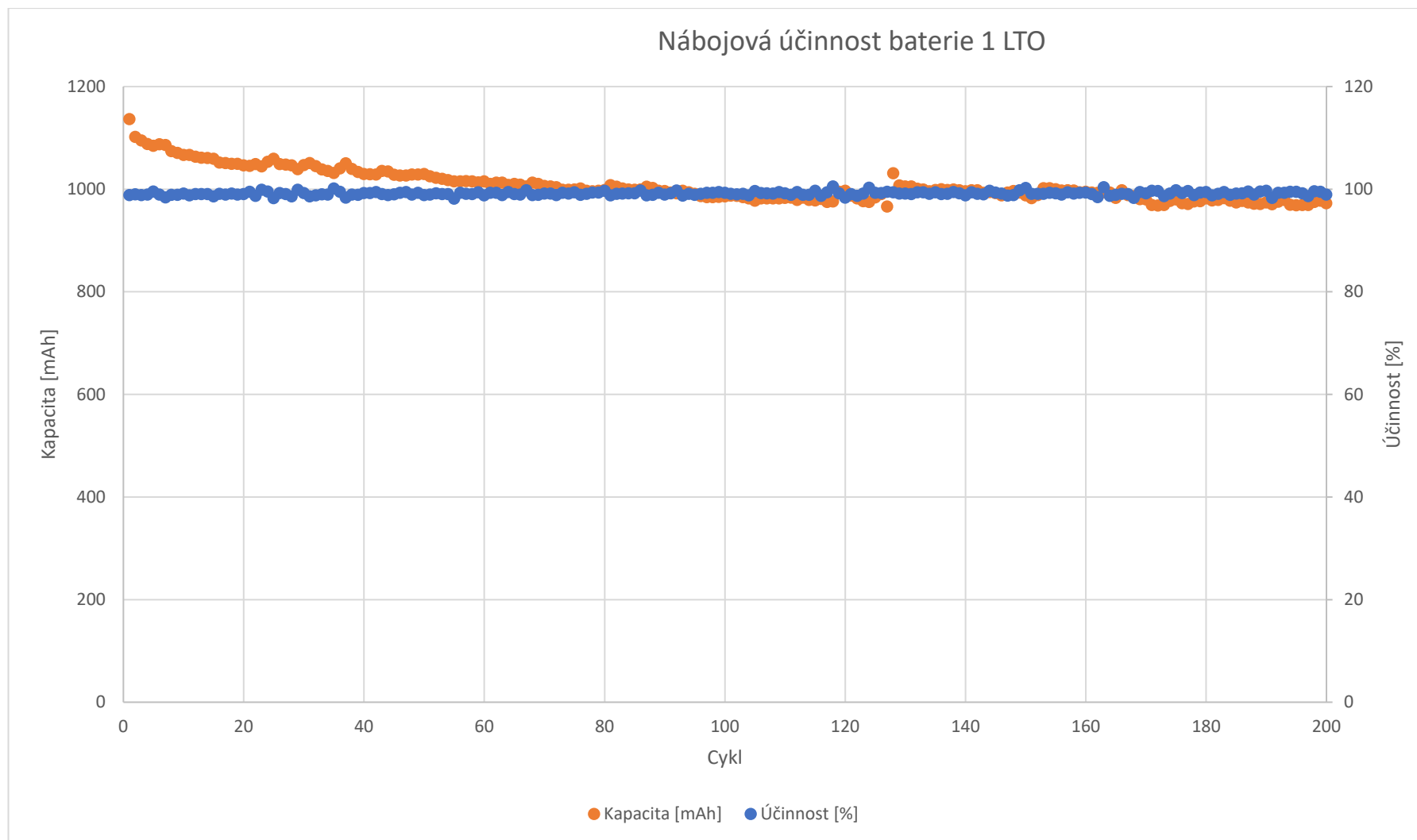
Graf 5.47 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LiFePO₄ za snížené teploty



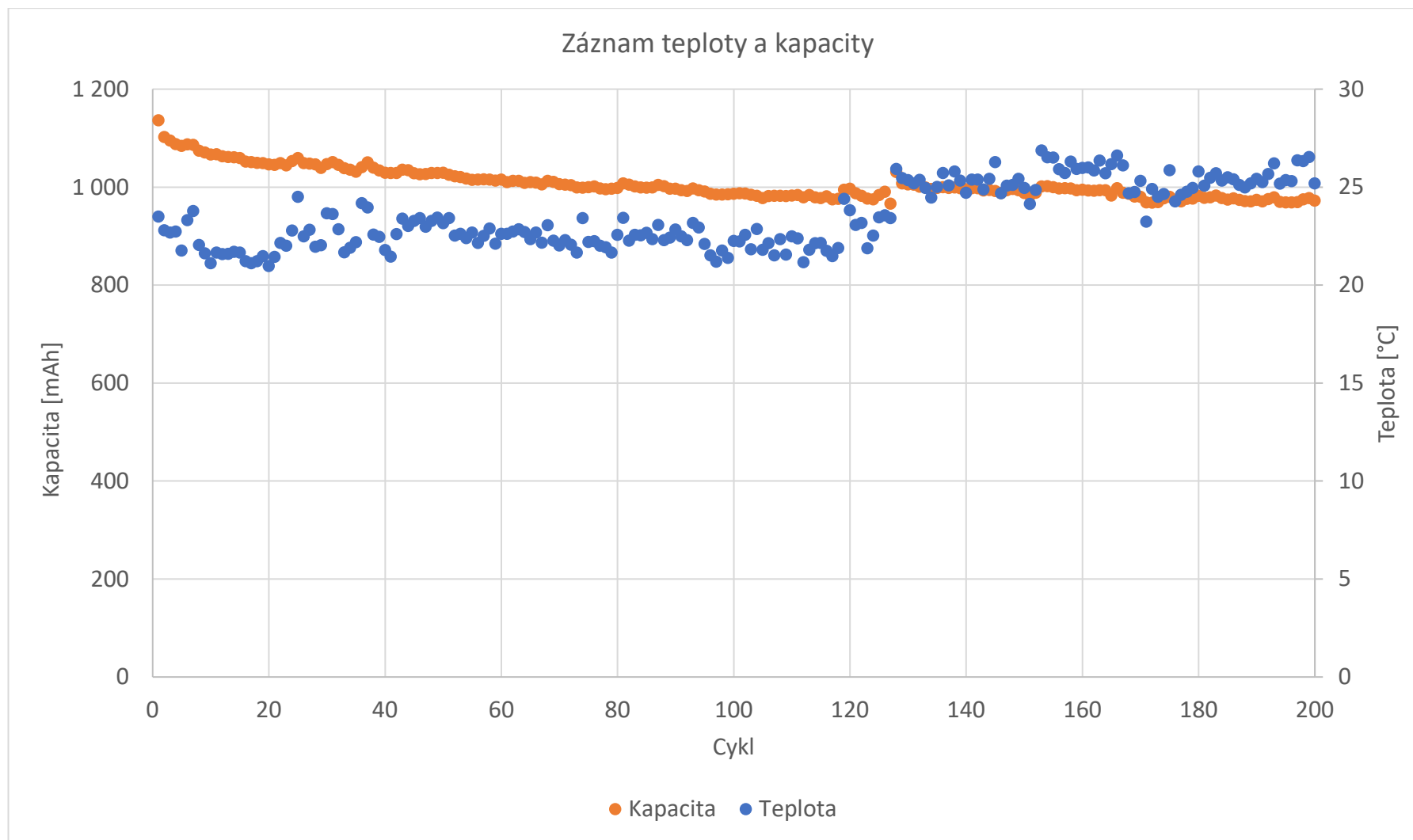
Graf 5.48 Zátěžová charakteristika baterie 2 LiFePO₄ za snížené teploty



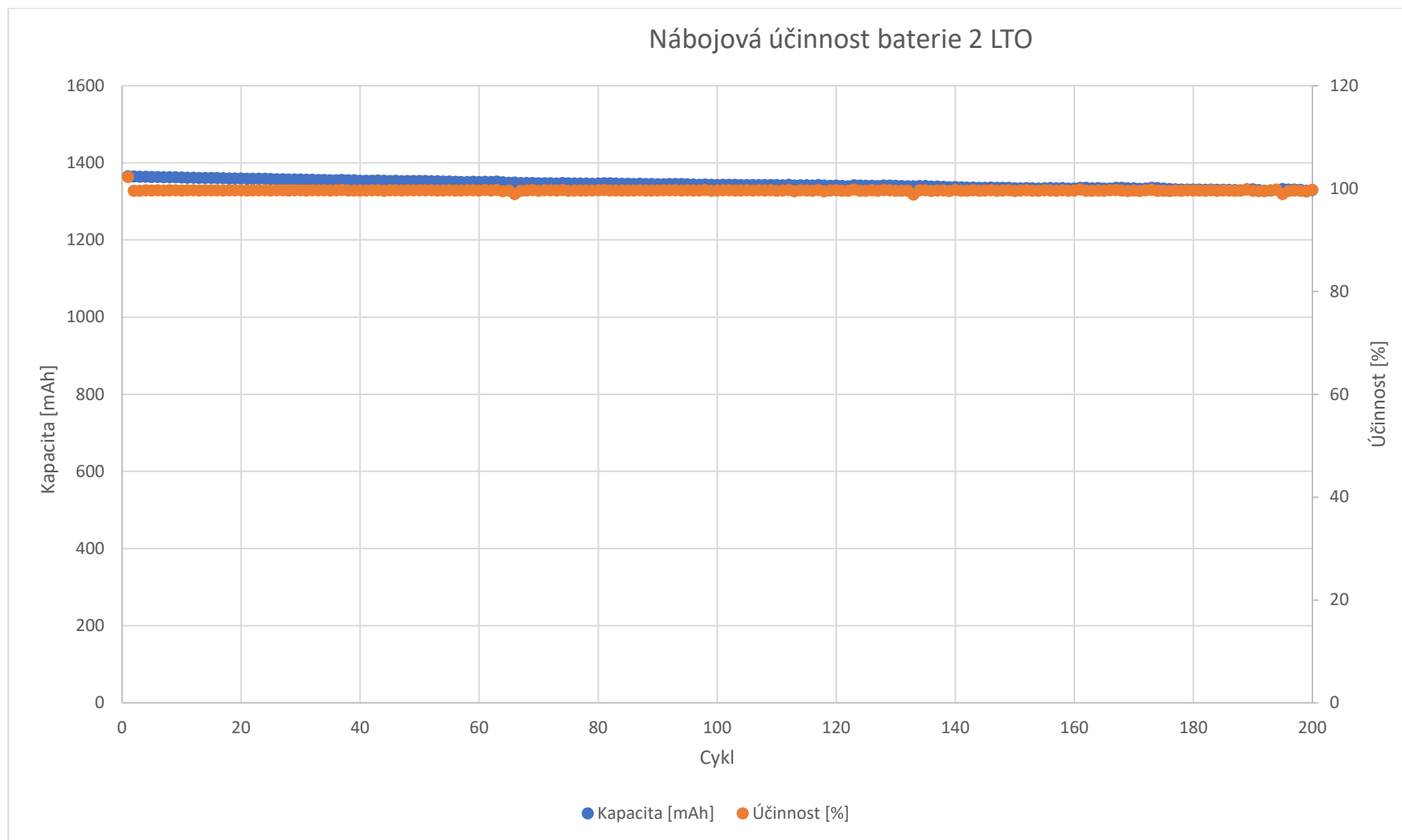
Graf 5.49 Ukázka cyklu (15) baterie LTO za pokojové teploty



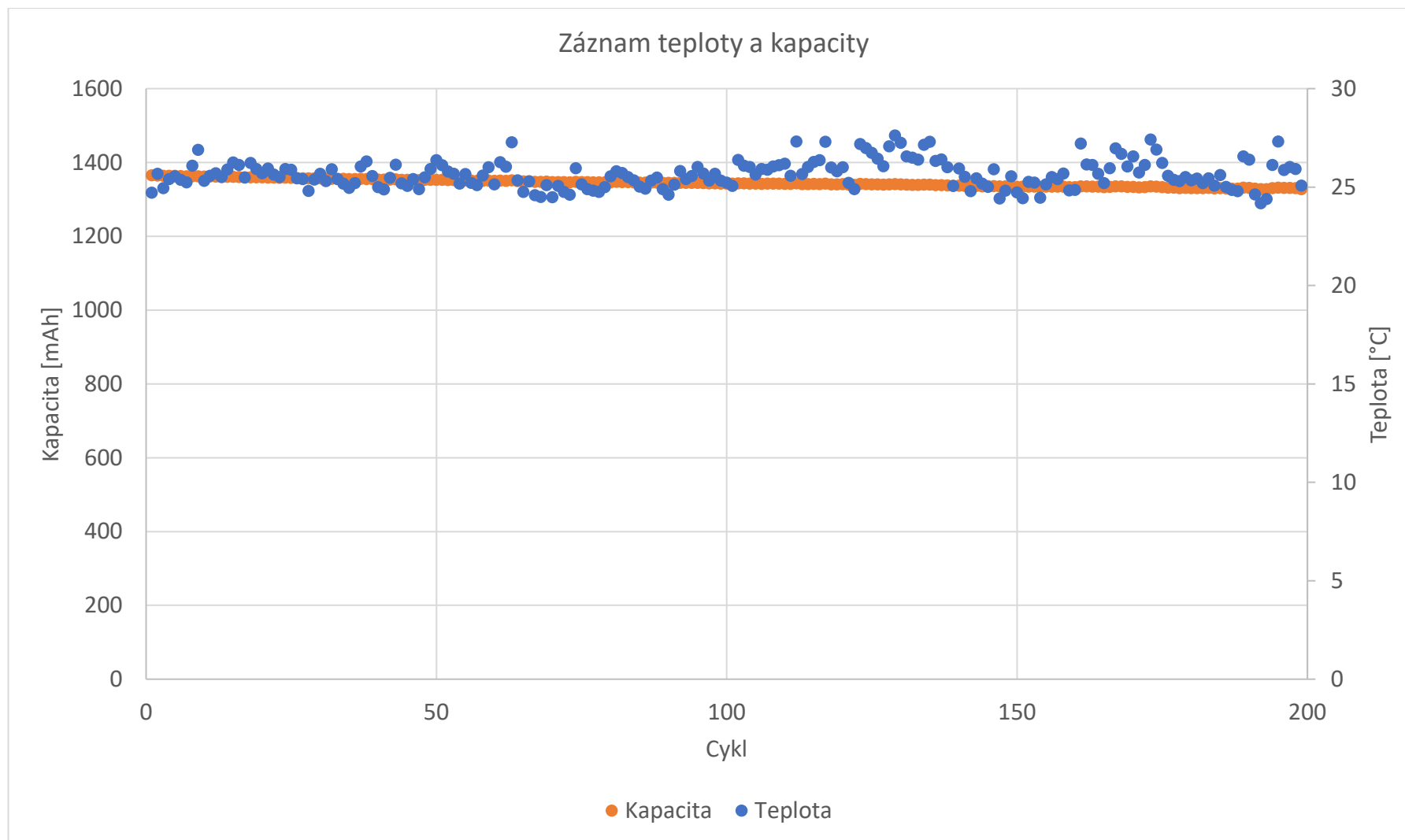
Graf 5.50 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za pokojové teploty



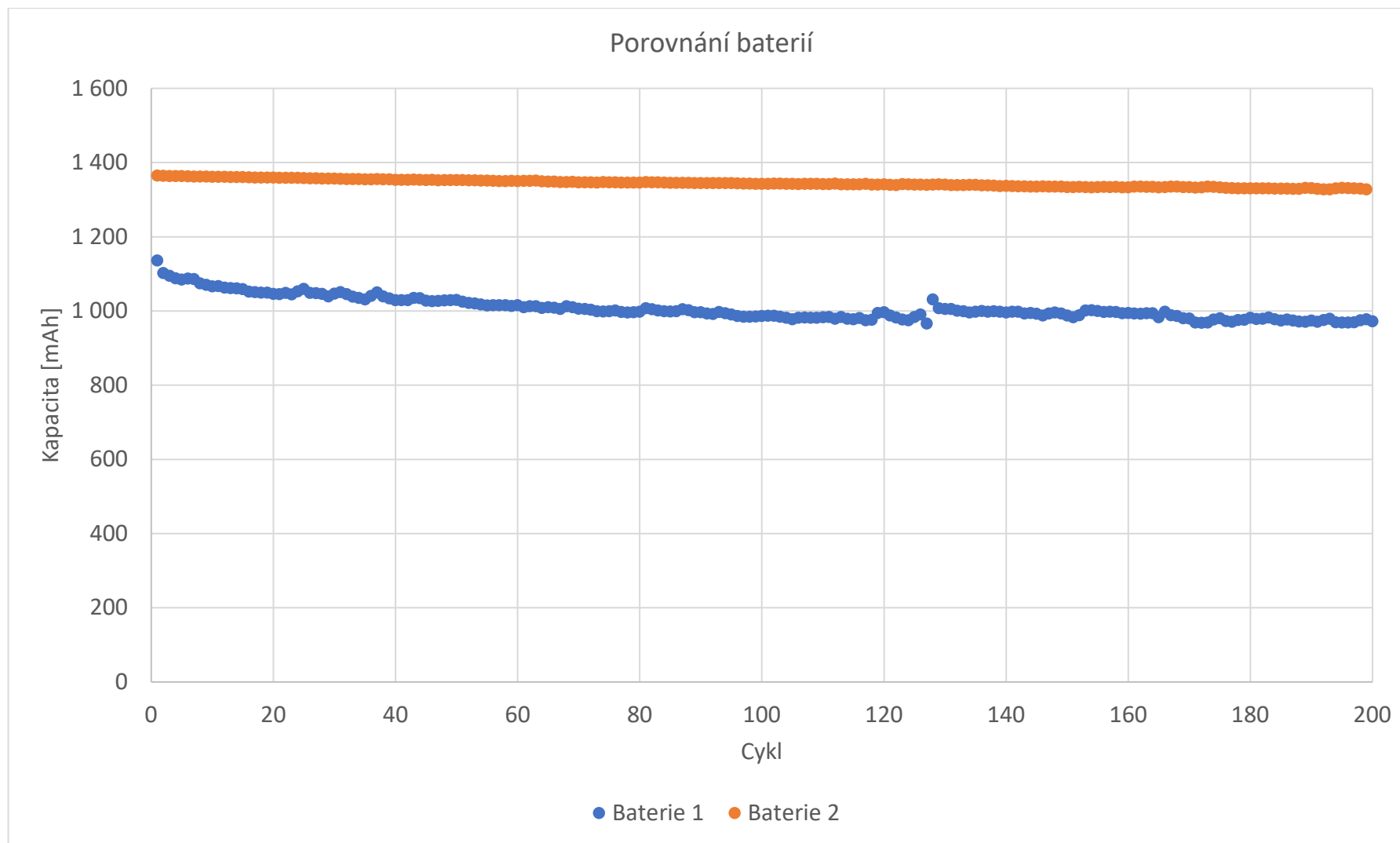
Graf 5.51 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za pokojové teploty



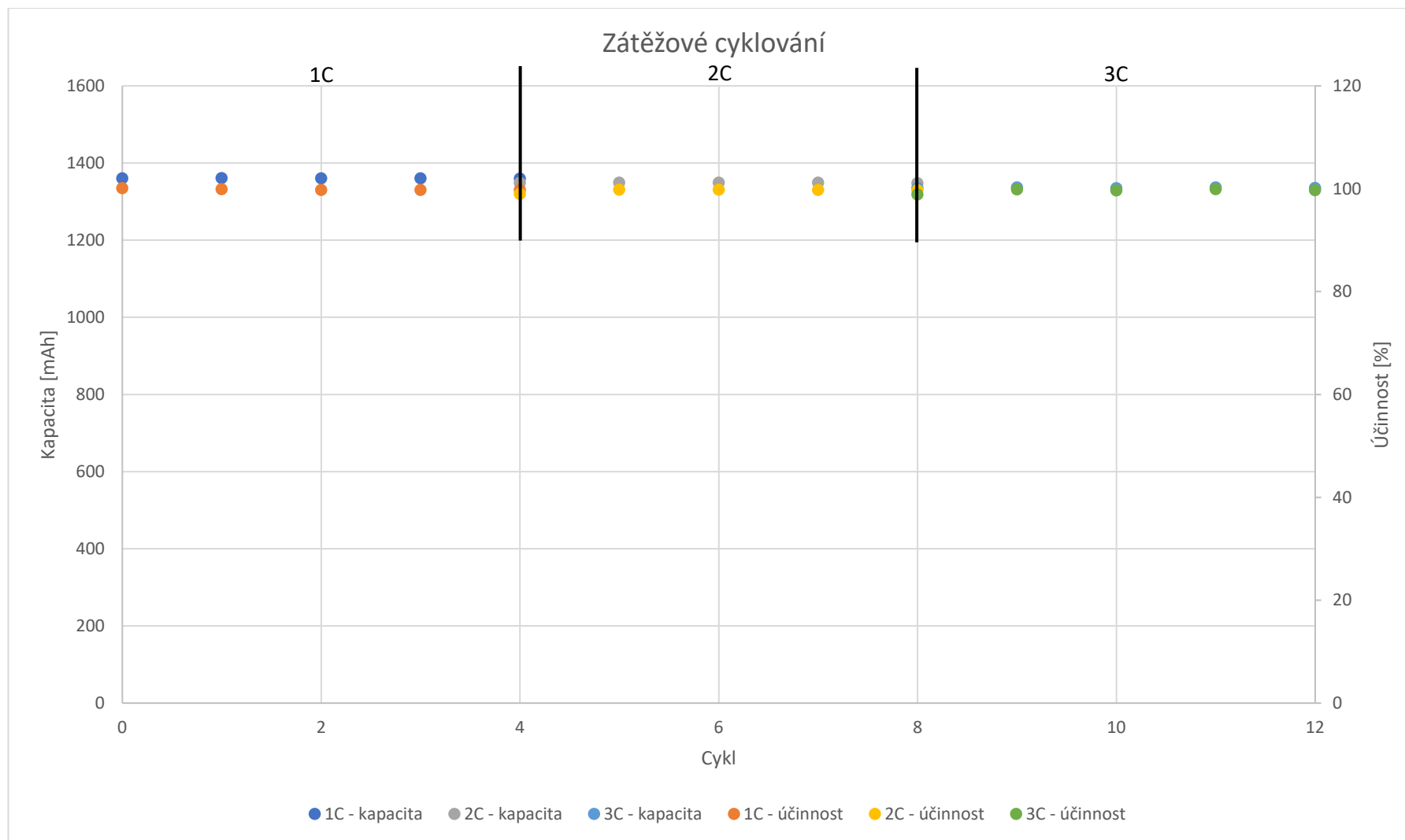
Graf 5.52 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za pokojové teploty



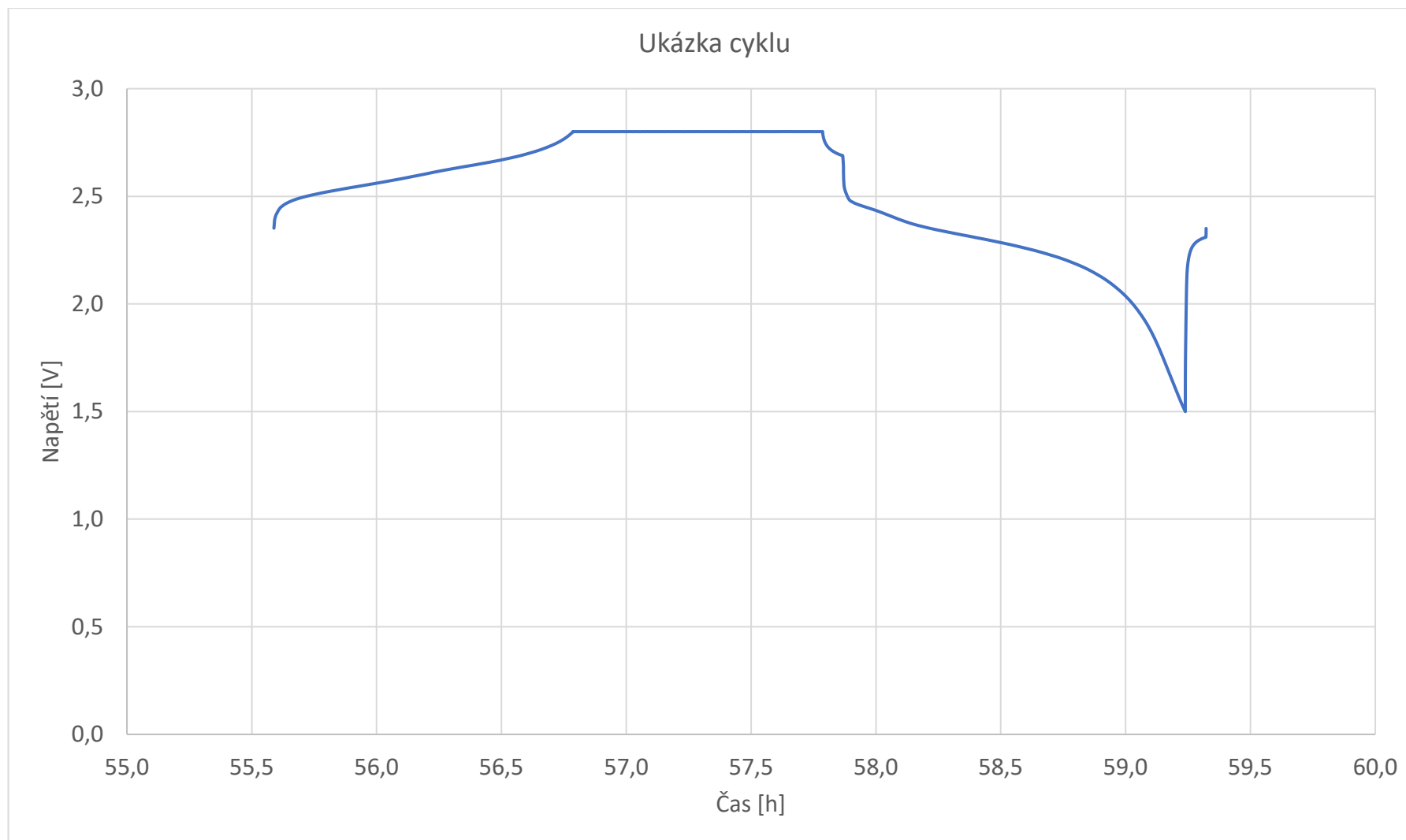
Graf 5.53 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za pokojové teploty



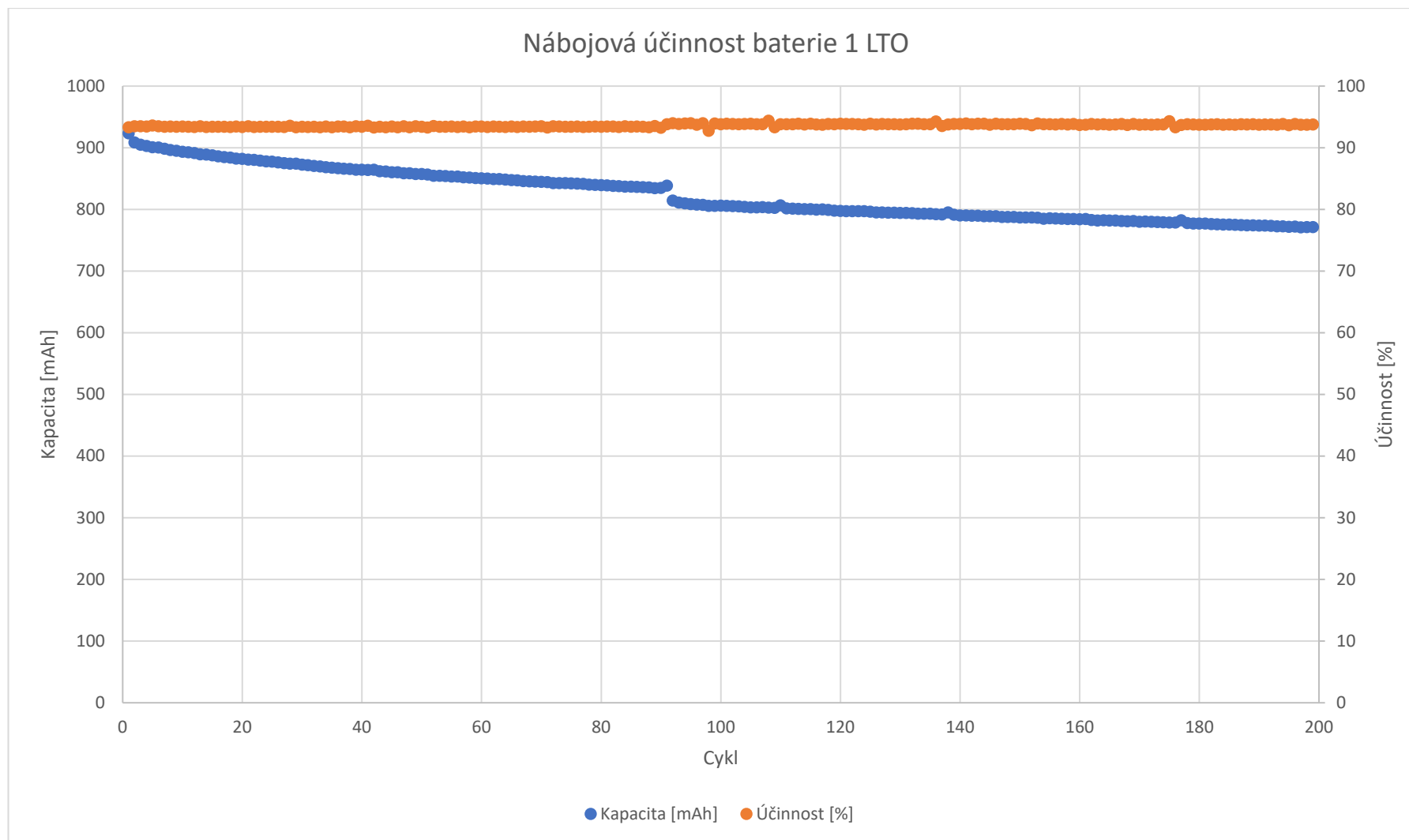
Graf 5.54 Porovnání baterií LTO za pokojové teploty



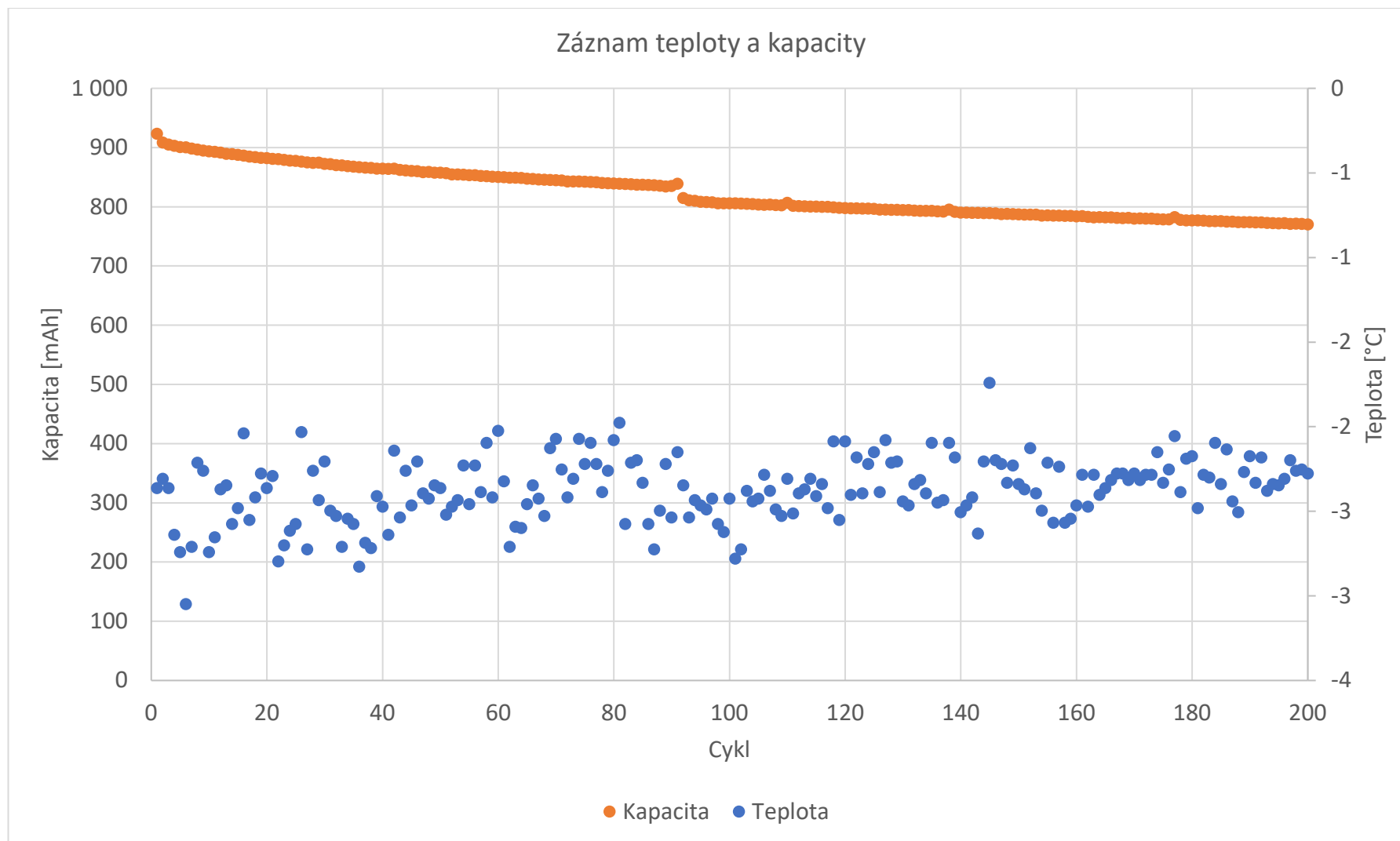
Graf 5.55 Zátěžové cyklování baterie 2 LTO za pokojové teploty



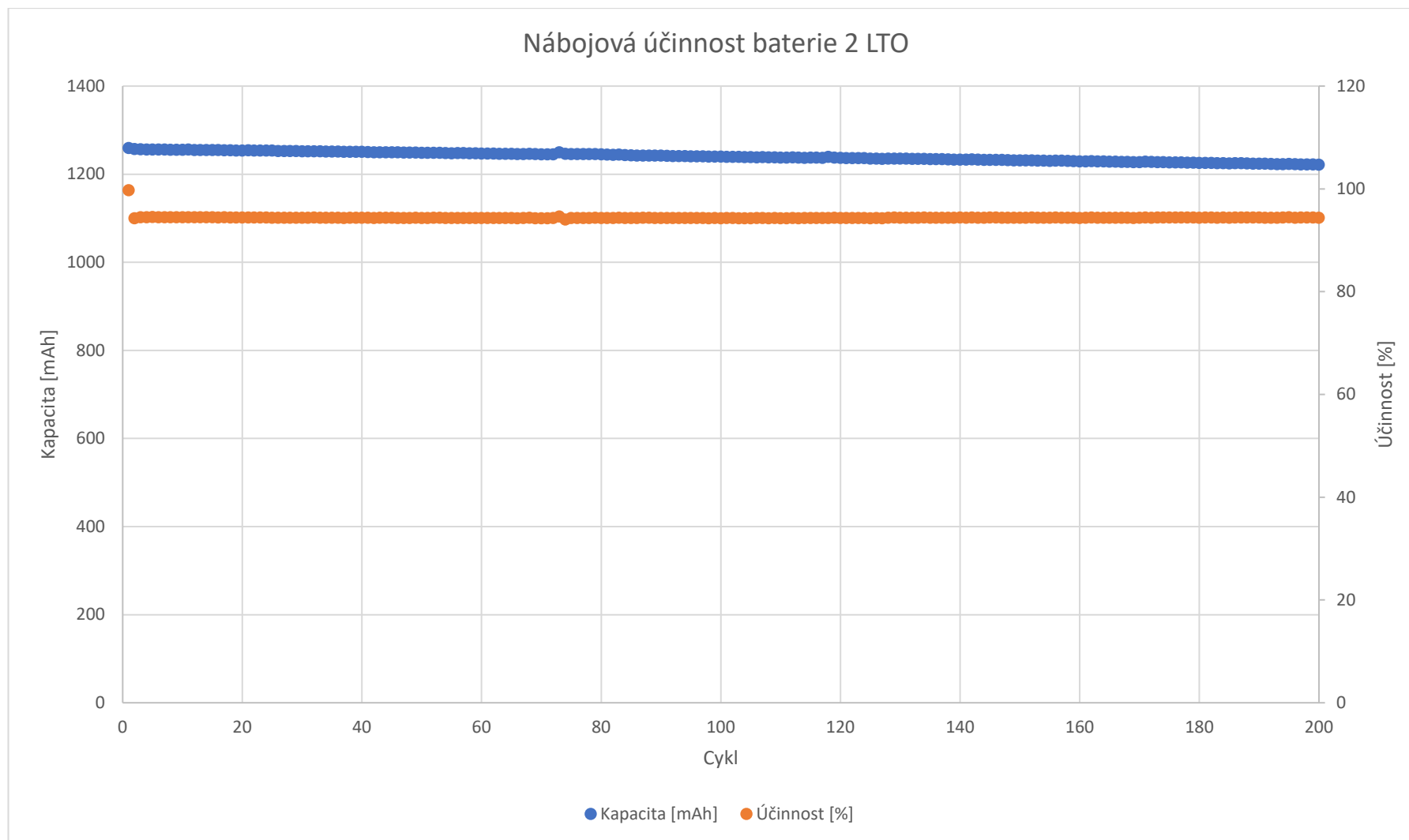
Graf 5.56 Ukázka cyklu (15) baterie LTO za snížené teploty



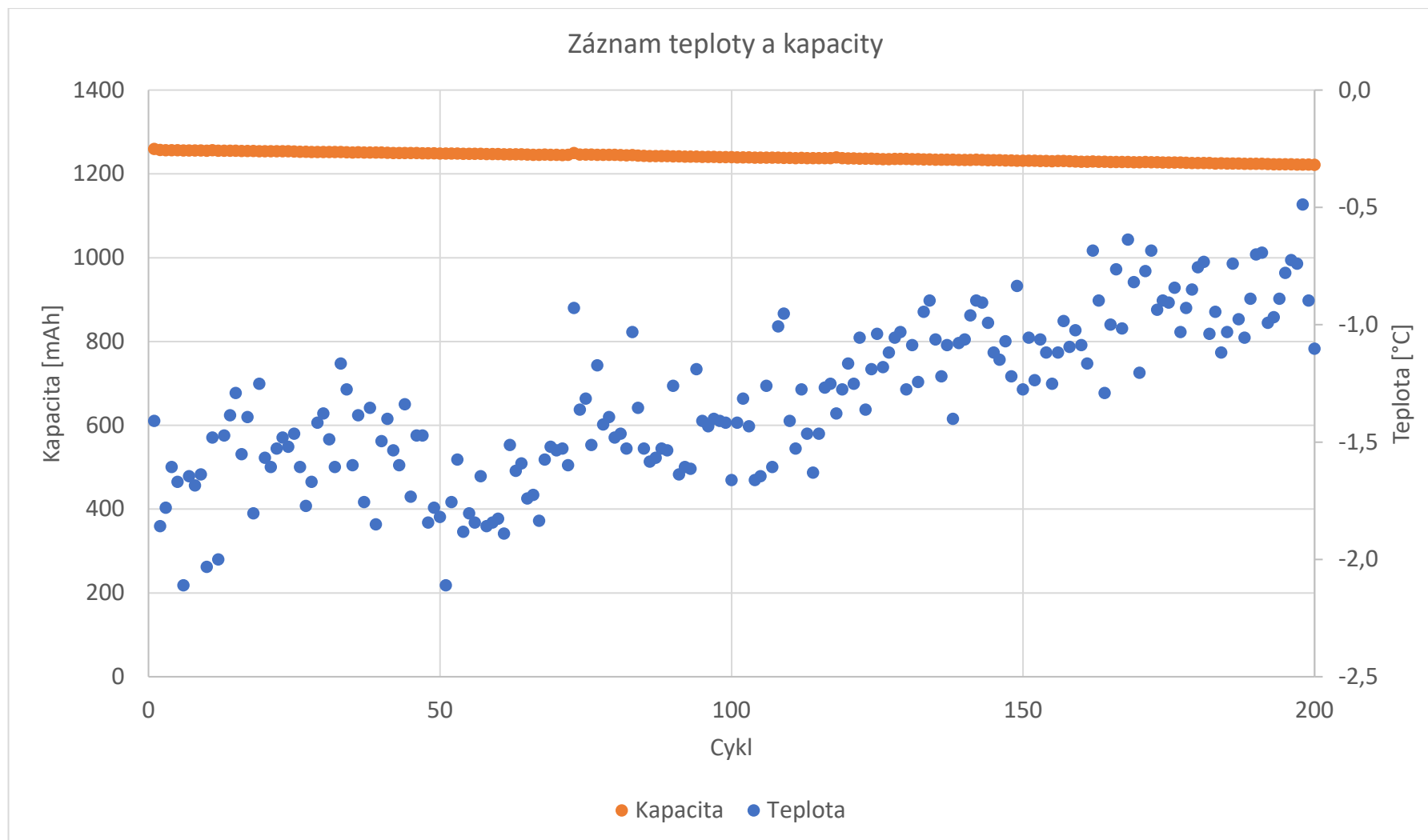
Graf 5.57 Nábojová účinnost baterie 1 LTO za snížené teploty



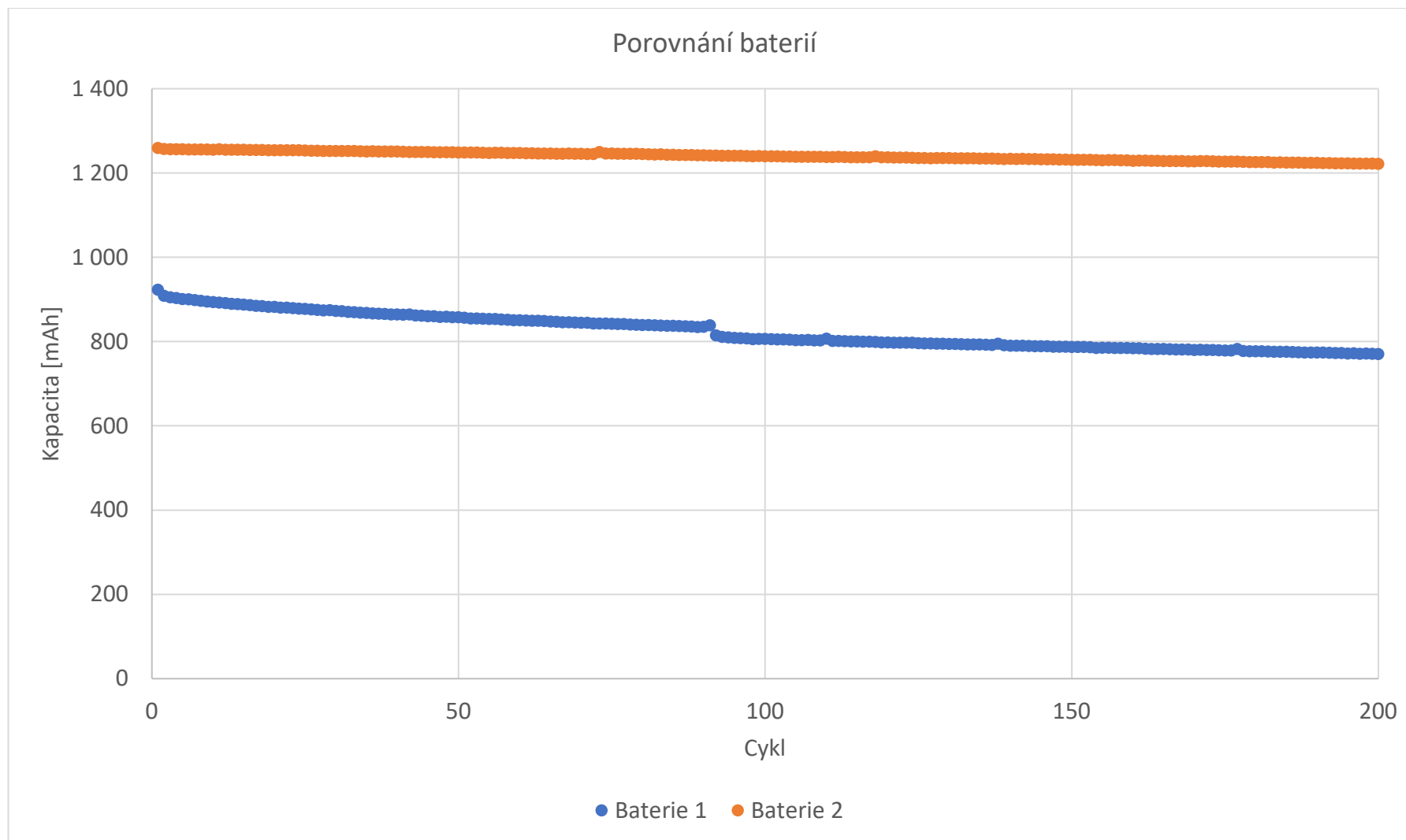
Graf 5.58 Záznam teploty a kapacity baterie 1 LTO za snížené teploty



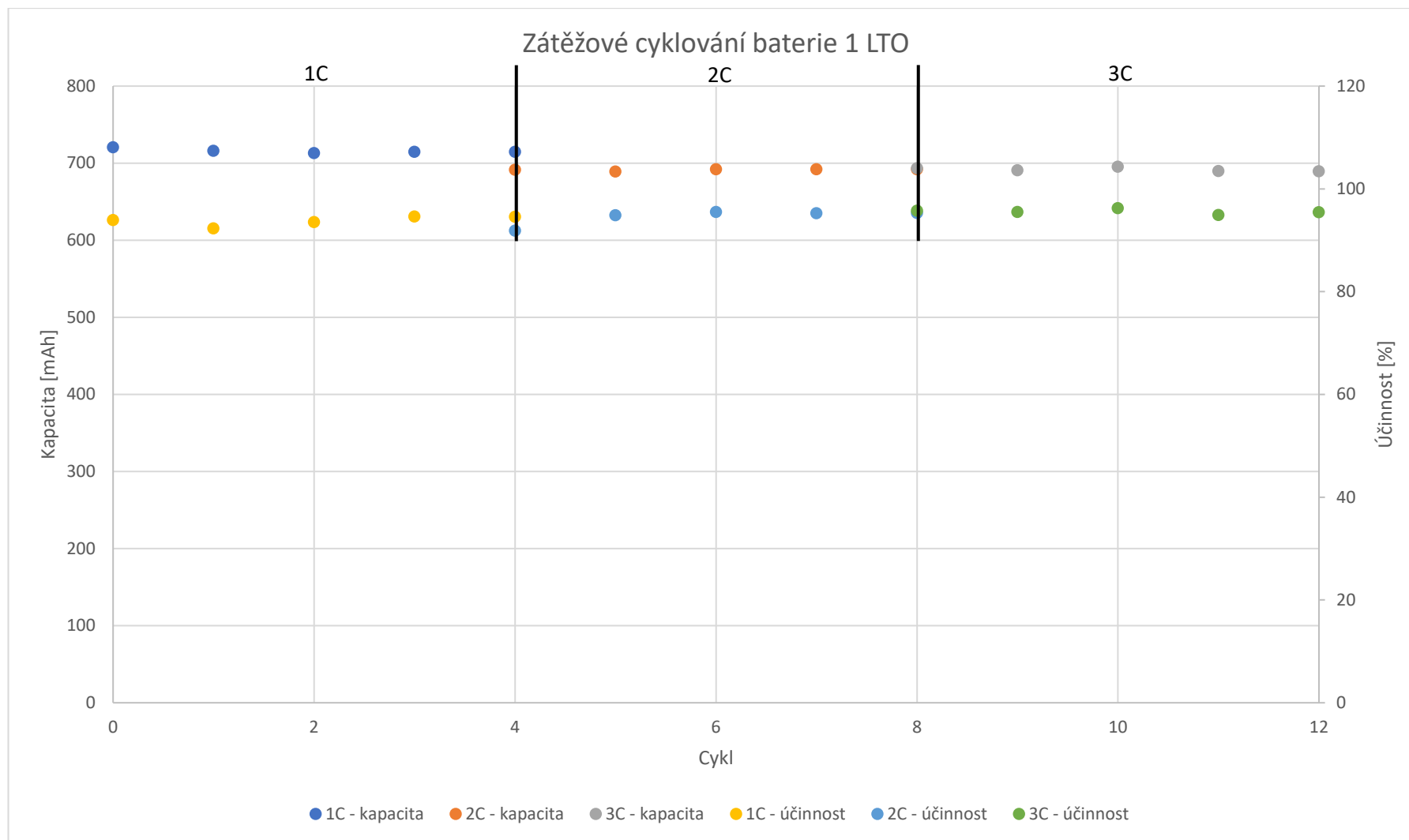
Graf 5.59 Nábojová účinnost baterie 2 LTO za snížené teploty



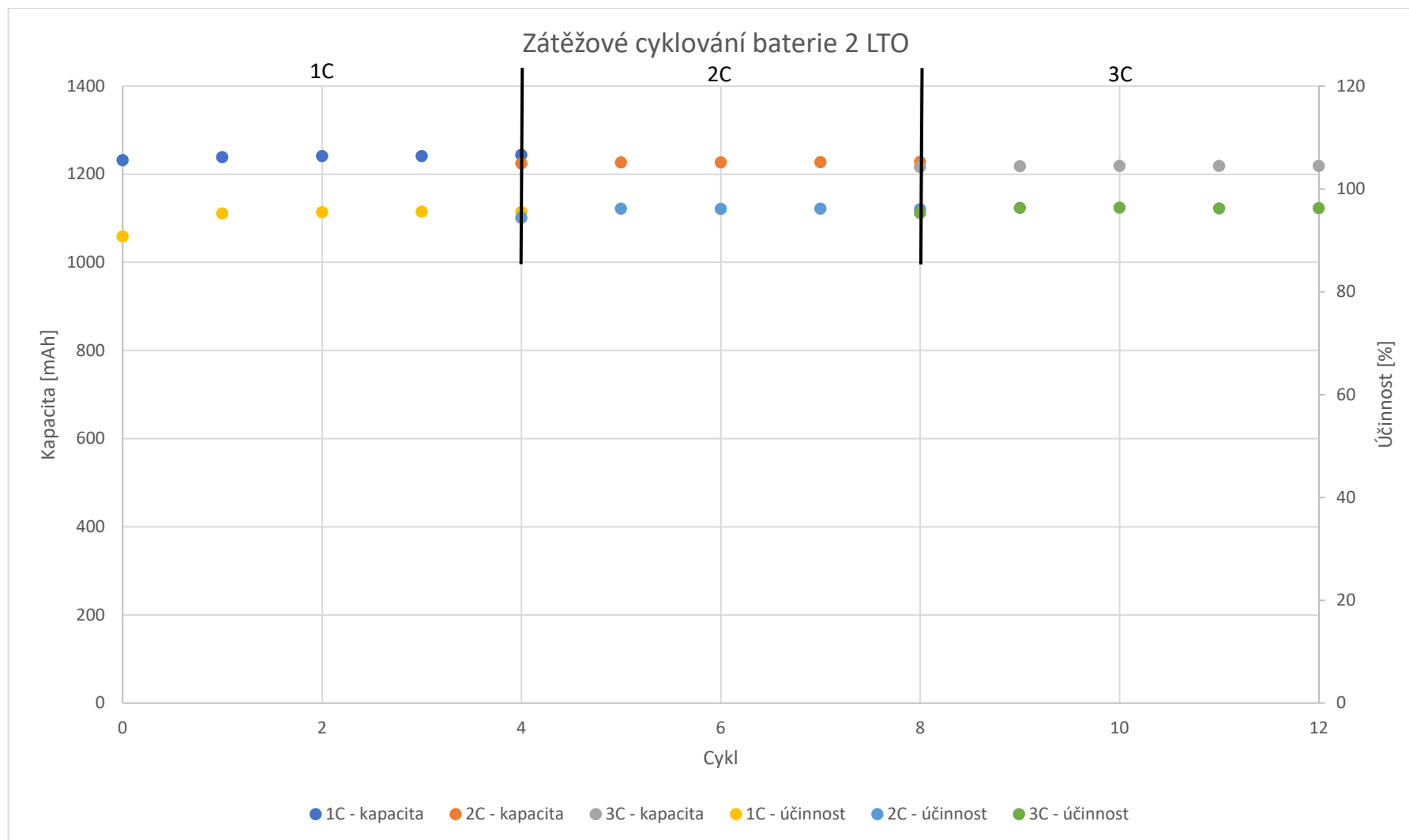
Graf 5.60 Záznam teploty a kapacity baterie 2 LTO za snížené teploty



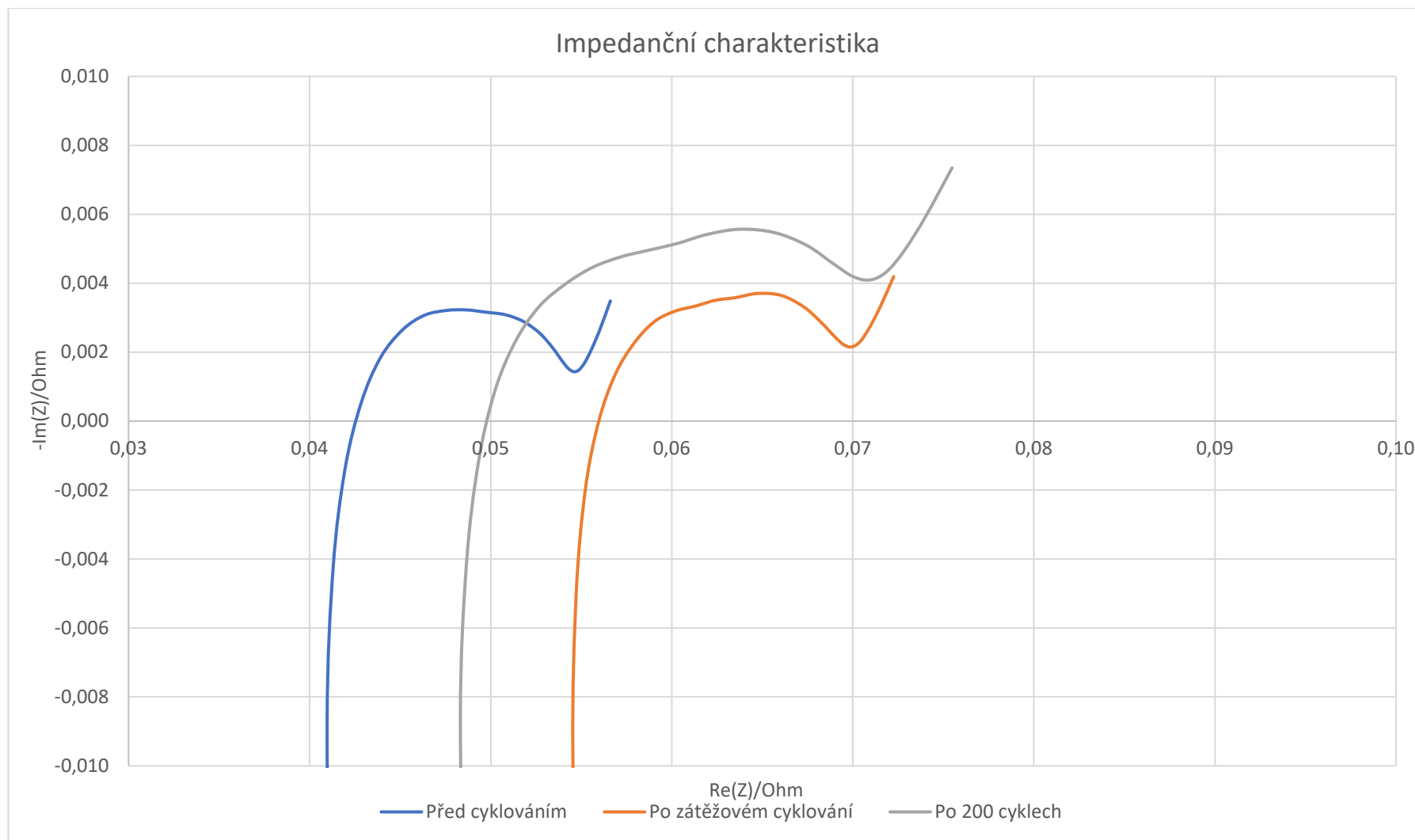
Graf 5.61 Porovnání baterií LTO za snížené teploty



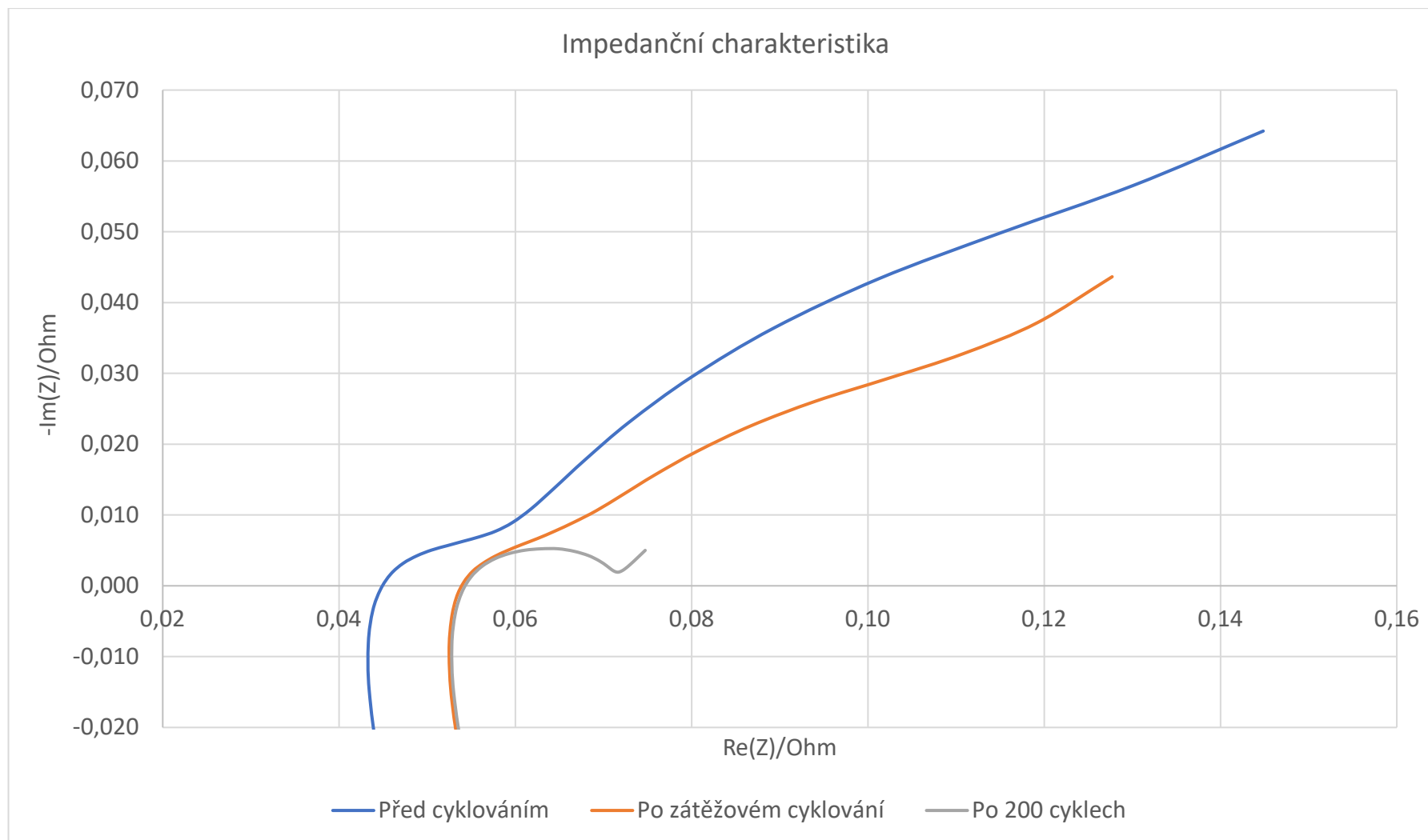
Graf 5.62 Zátěžové cyklování baterie 1 LTO za snížené teploty



Graf 5.63 Zátěžová charakteristika baterie 2 LTO za snížené teploty



Obrázek 5.1 Impedanční charakteristika baterie LG za nabitého stavu



Obrázek 5.2 Impedanční charakteristika baterie LG za vybitého stavu