EESTI LASTE KÕNE II

Vokaalide akustiline analüüs

EINAR MEISTER, LYA MEISTER

Artikli I osas uurisime põhitooni sageduse muutumist eesti laste kõnes (Keel ja Kirjandus 2017, nr 7, lk 518–533), II osas keskendume vokaalide akustilistele omadustele. Klassikaliselt kirjeldatakse vokaalide akustilist kvaliteeti spektraalsete tunnuste – formantide ehk kõnetrakti resonantssageduste abil. Vokaalide hääldamisel varieerub kõnetrakti kuju sõltuvalt alalõua, keele ja huulte asendist ning sellest tulenevalt võimenduvad kõnetraktis erinevad sagedused, moodustades spektraalseid mustreid. Vokaalide kvaliteedi määravad eelkõige kaks esimest formanti (F1, F2), täpsemaks kirjeldamiseks esitatakse kuni nelja formandi (F1–F4) sagedused. Formantsagedused on korrelatsioonis vokaalide artikulaatorsete põhitunnustega: F1 on seotud keele kõrgusega, F2 keele ees-tagapoolsusega ja F3 huulte ümardatusega. Tüüpiliselt esitatakse vokaalide formantsagedused F1–F2 teljestikus, mida nimetatakse ka akustiliseks vokaaliruumiks (vokaalide akustika ja artikulatsiooni kohta vt nt Eek 2008; Asu jt 2016; põhjalikumat teoreetilist käsitlust vt nt Fant 1960; Stevens 2000).

Vokaaliruumi suurust iseloomustab nn nurgavokaalide vaheline pindala (ingl *vowel space area*, VSA), mida arvutatakse nurgavokaalide formantsageduste F1 ja F2 põhjal (Flipsen, Lee 2012). Eesti keele nurgavokaalideks on /i, ä, a, u/; artikulaatorsetelt on nende vokaalide hääldamisel keele asendid perifeerseimad: /i/ hääldamisel kõrgel ees, /ä/ hääldamisel madalal ees, /a/ hääldamisel madalal taga, /u/ hääldamisel kõrgel taga, ülejäänud vokaalid moodustatakse keele vahepealsetes asendites. Keeltes, kus esineb ainult üks madal vokaal, moodustab vokaaliruumi vokaalide /i/-/a/-/u/ vaheline ruum. Vokaaliruumi pindala on kasutatud näiteks eri keelte vokaalisüsteemide võrdlemisel, laste kõne arengu uurimisel, sotsiolingvistilistes ning kõne arusaadavuse uuringutes (vt ülevaadet Flipsen, Lee 2012).

Vokaalide formantsagedused ja vokaaliruumi suurus on otseselt seotud kõnetrakti anatoomilise suurusega. Magnetresonantstomograafia uuringutes on leitud 2–4-aastaste laste kõnetrakti keskmiseks pikkuseks (mõõdetuna häälekurdudest kuni huulte väliskontuurini) 9,9 cm, 13–14-aastastel 13,9 cm; erinevused poiste ja tüdrukute kõnetrakti pikkuses on registreeritud alates 15. eluaastast: 15–16-aastastel poistel 14,6 cm ja tüdrukutel 13,7 cm, 17–18-aastastel poistel 15,6 cm ja tüdrukutel 14,4 cm (Fitch, Giedd 1999). Houri Vorperiani jt (2011) uuring hõlmas katsealuseid vastsündinutest kuni 20. eluaastani ja selles mõõdeti kõnetrakti 9 parameetrit. Leiti, et sooline erinevus kõnetrakti pikkuses muutub statistiliselt oluliseks alates 12. eluaastast, samal ajal varieerus erinevate parameetrite oluliseks muutumise vanus vahemikus 9–14 aastat.

Kõneproduktiooni akustilise teooria (Fant 1960) kohaselt kaasneb kõnetrakti pikkuse kasvamisega formantsageduste alanemine. Sellest tulevalt võiks eeldada, et vokaalide formantsagedused alla 12-aastastel poistel ja tüdrukutel oluliselt ei erine, sest poiste ja tüdrukute kõnetrakti pikkus on selle vanuseni praktiliselt võrdne (vt andmeid eespool).

Erinevate uurijate andmeid koondavas töös (Vorperian, Kent 2007) on leitud, et poiste vokaalide formantsagedused on süstemaatiliselt madalamad tüdrukute formantsagedustest alates 7.–8. eluaastast, sooline erinevus muutub statistiliselt oluliseks keskmiselt 12-aastaselt ja kujuneb lõplikult välja 15. eluaastaks. Teisalt on leitud ka, et poiste vokaalide formantsagedused on tüdrukute omadest madalamad juba 4-aastaselt (nt Perry jt 2001; Whiteside, Hodgson 2000) ning et poiste ja tüdrukute formantsageduste erinevused hakkavad ilmnema alles 11 aasta vanuselt (Lee jt 1999).

Formantsageduste alanemisega lapse- ja noorukieas kaasneb ka vokaaliruumi pindala vähenemine ja stabiliseerumine pärast 15. eluaastat. Andmed VSA sooliste erinevuste kohta varieeruvad suurel määral: Perry jt (2001) uuringust selgub, et poiste ja tüdrukute VSA erinevused ilmnevad juba 4-aastaselt, Peter Flipseni ja Sungbok Lee (2012) andmetel aga alles 16-aastaselt.

Eesti vokaalide akustilisi omadusi täiskasvanud keelejuhtide kõnes on uuritud alates 1960. aastatest ja andmeid nende vokaalide kvaliteedi kohta eri kõnestiilides on hulgaliselt (vt ülevaadet Asu jt 2016: 29–47). Käesolevas artiklis esitame esmakordselt eesti laste vokaalide akustilise analüüsi tulemusi. Meie peamised uurimisküsimused käsitlevad vokaaliformantide ja vokaaliruumi suuruse muutust sõltuvalt soost ja vanusest, lisaks analüüsime keelejuhtide murdetasta ja vokaali kestusastme mõju vokaalide kvaliteedile.

1. Uurimismaterjal ja meetod

Vokaalide akustiliseks analüüsiks kasutame artikli esimeses osas (Meister, Meister 2017) kirjeldatud korpust. Analüüsitav materjal sisaldab 305 keelejuhi kõnet, igaühelt 21 käsitsi märgendatud lauset, kokku 6405 lauset (välja on jäetud 9-aastased (neli keelejuhti), sest võrreldes teiste vanuserühmadega on nende esindatus korpuses väga väike). Formantiväärtuste leidmiseks koostasime Praati (Boersma, Weenink 2018) skripti, mis rakendab formantanalüüsiks Burg-meetodit keelejuhi soost ja vanusest sõltuvate valikuparameetritega. Tüdrukutel ja kuni 13 aasta vanustel poistel on maksimaalne formantsagedus 5500 Hz, vanematel poistel 5000 Hz; maksimaalne formantide arv on kõigil keelejuhtidel 5. Kõigi vokaalide (kokku 65 720) formantsagedused F1–F4 mõõdeti vokaali keskosas lõigust, mille kestus moodustas 20% vokaali kogukestusest. Sõltuvalt vokaali asukohast klassifitseeriti eraldi esisilbis (kokku 28 070 vokaali, tähistatud edaspidi V1) ja järgsilpides asuvad vokaalid (kokku 37 650, tähistatud edaspidi V2). Üldjuhul on V1 rühmas rõhulised ja V2 rühmas rõhutud vokaalid; V2 rühma liigitati ka pikemate sõnade kaaserõhulistes silpides paiknevad vokaalid.

Formantanalüüsi tulemuste esmane vaatlus näitas, et sõltuvalt vokaalist, vanusest ja soost on formantiväärtuste hulgas küllalt palju automaatse

algoritmi põhjustatud vigu, mida kinnitas ka häälbivate tulemuste valikuline kontroll spektrogrammide abil. Selgelt häälbivate formandiväärtuste elimineerimiseks arvutati kõigi vokaalide F1–F4 keskväärtused ning standardhälbed igas vanuserühmas ja eraldati need mõõtmistulemused, mis erinesid keskväärtusest enam kui $\pm 1,5$ standardhälbe võrra. Seejärel hinnati visuaalselt probleemsemate juhtude (nt vanemate poiste /u/- ja /o/-vokaalide) F1 ja F2 väärtuste histogramme ning vajadusel eemaldati ekstreemsed mõõtetulemused. Näitena on joonisel 1 esitatud 15-aastaste poiste esisilbi /u/-vokaalide F2 mõõtetulemuste filtreerimine kahes etapis.

Joonis 1. 15-aastaste poiste esisilbi /u/-vokaalide F2 väärtuste histogrammid. Vasakul andmete jaotus enne esimest filtreerimist; jäme kriipsjoon vastab valimi keskväärtusele 1031 Hz, peened kriipsjooned $\pm 1,5$ standardhälbele (vastavalt 548 Hz ja 1514 Hz). Paremal andmete jaotus pärast esimest filtreerimisetappi; peen kriipsjoon vastab sagedusele 1360 Hz, millest kõrgemad F2 väärtused filtreeriti teises etapis, jäme kriipsjoon vastab valimi keskväärtusele 951 Hz pärast teist filtreerimist.

Kahe filtreerimisetapi tulemusena jäid lõplikku valimisse 24 502 (87,3% algsest valimist) rõhulise vokaali (V1) mõõteandmed; nende jaotus vokaalide kaupa on esitatud tabelis 1 (V1 vokaalide arv vanuseti on toodud tabelis 2). Pole siiski välistatud, et ka pärast filtreerimist jäi andmetesse mõõtmisvigu, kuid sellise hulga vokaalide automaatsete mõõtmisandmete käsitsi ülekontrollimine on ebareaalne.

Vokaaliformantide vanuselise muutuse esitamiseks kasutame formantdünaamika meetodit (nt McDougall, Nolan 2007; Jacewicz, Salmons 2011), mida tavaliselt on kasutatud vokaalide, eelkõige diftongide, kvaliteedimuutuste kirjeldamiseks vokaali kestel (seda on kasutatud nt ka Kihnu vokaalide analüüsis, vt Türk jt 2016). Meetodi kohaselt mõõdetakse formandiväärtusi kindla intervalli järel kogu vokaali kestuse jooksul ja tulemused esitatakse vokaalivärvide muutust kajastava trajektooriga. Käesoleval juhul on ajavahemikuks aasta ja mõõteväärtusteks iga vanuserühma keskmised F1 ja F2 sagedused (eraldi poistel ja tüdrukutel). Tulemuseks saame vokaalivärvide ealist

muutust kirjeldava trajektoori F1–F2 akustilises ruumis. Vokaalitrajektoor koosneb seega kaheksast lõigust (10–11, 11–12, 12–13, 13–14, 14–15, 15–16, 16–17 ja 17–18 aastat), millest igaühe pikkus (ingl *vowel section length*, VSL) on leitud valemiga (Jacewicz, Salmons 2011):

$$VSL_n = \sqrt{(F1_n - F1_{n+1})^2 + (F2_{n+1})^2}$$

Tabel 1.

Lõpliku valimi vokaalide jaotus

Sugu	Kestus-aste	/a/	/e/	/i/	/o/	/u/	/õ/	/ä/	/ö/	/ü/
M		3170	1409	1137	1853	1222	461	667	265	509
	lühike	2656	925	916	1431	920	397	577	31	419
	pikk	270	217	70	191	91	35	55	40	34
	ülipikk	244	267	151	231	211	29	35	194	56
N		4346	1673	1453	2157	1570	635	869	339	767
	lühike	3674	1105	1169	1626	1175	550	749	47	642
	pikk	353	268	96	251	122	40	67	44	43
	ülipikk	319	300	188	280	273	45	53	248	82

Vokaalitrajektori pikkus (ingl *trajectory length*, TL) leitakse kaheksa lõigu pikkuste summana.

Akustilise vokaaliruumi pindala (ingl *vowel space area*, VSA) arvutame järgmise valemiga (Flipsen, Lee 2012):

$$VSA = 0,5 \times \{(F2/i/ \times F1/ä/ + F2/ä/ \times F1/a/ + F2/a/ \times F1/u/ + F2/u/ \times F1/i/) - (F1/i/ \times F2/ä/ + F1/ä/ \times F2/a/ + F1/a/ \times F2/u/ + F1/u/ \times F2/i/)\}$$

Tulemuste statistiliseks analüüsiks¹ kasutame R-keskkonda (R Core Team 2018) ja programmi RStudio (RStudio Team 2015). Formantsageduste F1 ja F2 sõltuvuse uurimiseks keelejuhi soo, vanuse, murdepiirkonna ja kestusastme järgi koostasime lineaarse regressiooni segamudelid (R-paketiga lme4 (Bates jt 2015)); jooniste jaoks kasutasime R-paketti phonR (McCloy 2016).

2. Tulemused

2.1. Vokaalide formantsagedused

Poiste ja tüdrukute eri vanuserühmade rõhuliste vokaalide (V1) keskmised formantsagedused (F1, F2) ja standardhälbed (F1sh, F2sh) on esitatud tabelis 2. Formantsageduste vanuselist muutust illustreerivad silutud kõverad joonisel 2 on leitud tabeli 2 andmete põhjal lokaalse regressiooni meetodit kasutades.

¹ Artiklis oleme vältinud teksti üleküllastamist mahukate statistiliste arvnäitajatega, esitame need tulevastes erialastes publikatsioonides.

Tabel 2.

**Poiste ja tüdrukute eri vanuserühmade rõhuliste vokaalide (V1)
keskmised formantsagedused (F1, F2) ja standardhälbed (F1sh, F2sh)
(n = analüüsitud vokaalide arv)**

V1	Vanus	Poisid					Tüdrukud				
		n	F1	F1sh	F2	F2sh	n	F1	F1sh	F2	F2sh
/a/	10	265	748	91	1455	164	340	787	122	1576	227
	11	421	712	86	1461	174	550	767	87	1530	181
	12	283	693	83	1443	187	553	769	92	1554	171
	13	435	656	83	1337	150	771	749	97	1539	211
	14	413	604	70	1307	148	758	719	93	1515	197
	15	531	573	66	1231	163	393	695	85	1491	194
	16	415	575	60	1267	159	521	704	89	1485	209
	17	182	572	56	1187	123	247	706	77	1483	165
	18	225	573	62	1268	170	213	704	60	1445	221
/e/	10	116	573	60	2324	189	95	582	82	2478	193
	11	188	565	61	2215	198	212	569	59	2388	214
	12	138	548	52	2215	187	197	579	58	2282	247
	13	190	516	56	1989	213	349	574	70	2285	228
	14	183	475	51	1913	210	292	556	68	2198	227
	15	234	459	43	1839	190	145	535	58	2156	176
	16	194	465	50	1832	181	201	545	67	2150	192
	17	79	466	44	1708	144	94	555	72	2168	163
	18	87	455	41	1825	161	88	526	59	2173	162
/i/	10	123	438	51	2718	249	103	436	57	2859	252
	11	147	435	44	2631	244	157	438	46	2789	189
	12	103	422	47	2611	166	220	438	43	2660	220
	13	146	395	44	2388	245	251	437	49	2681	230
	14	158	359	47	2206	203	228	425	43	2569	208
	15	193	341	42	2085	196	163	410	55	2562	200
	16	113	350	41	2109	200	161	419	40	2532	239
	17	60	337	50	1998	148	96	420	40	2569	193
	18	94	349	35	2104	204	74	400	34	2600	150
/o/	10	175	563	61	1177	240	165	574	71	1165	222
	11	232	551	56	1169	194	273	576	67	1169	209
	12	162	546	56	1157	192	277	571	55	1180	156
	13	264	525	60	1095	192	378	562	60	1165	191
	14	243	504	56	1099	200	356	559	50	1165	170
	15	331	485	46	1042	194	192	550	47	1174	174
	16	207	476	37	1035	185	263	551	54	1179	199
	17	109	489	55	1025	166	136	536	47	1149	188
	18	130	478	59	1028	176	117	526	50	1128	181

/u/	10	113	449	48	990	199	102	464	46	965	160
	11	135	450	36	956	152	205	469	49	1015	192
	12	107	453	39	977	149	222	468	46	1050	203
	13	177	433	49	966	185	293	454	45	1049	193
	14	160	418	42	978	183	261	451	39	1054	180
	15	208	387	40	951	181	137	448	34	1001	187
	16	155	399	39	943	184	163	445	32	1012	166
	17	89	386	54	901	159	104	439	46	998	200
	18	78	380	46	945	161	83	417	31	1008	172
/õ/	10	40	519	53	1514	156	39	544	66	1649	134
	11	44	514	42	1502	129	81	541	66	1602	138
	12	44	526	50	1495	150	86	533	61	1601	158
	13	60	490	51	1414	117	118	527	66	1595	155
	14	59	480	55	1378	109	123	512	63	1526	137
	15	86	442	36	1300	98	44	485	50	1491	147
	16	62	458	44	1325	93	70	513	54	1535	113
	17	24	461	41	1348	98	33	494	50	1489	139
	18	42	450	62	1334	82	41	482	53	1483	78
/ä/	10	48	797	109	1940	156	48	828	138	2034	127
	11	94	740	95	1878	148	117	816	111	1926	182
	12	58	706	90	1829	129	109	813	101	1897	180
	13	98	679	99	1699	151	186	798	120	1893	172
	14	96	621	71	1608	137	144	764	105	1841	149
	15	91	594	77	1548	117	62	737	74	1834	105
	16	95	608	81	1557	136	107	756	95	1840	177
	17	47	578	61	1495	104	57	754	91	1845	138
	18	40	606	70	1528	138	39	749	69	1838	118
/ö/	10	27	492	44	1938	141	18	532	40	2110	83
	11	36	507	29	1958	118	40	525	37	2008	127
	12	25	506	20	1817	173	40	537	45	1969	121
	13	28	486	43	1792	162	54	527	59	1982	130
	14	32	457	36	1658	77	80	525	49	1903	119
	15	44	427	26	1615	118	20	497	52	1823	129
	16	40	444	25	1591	120	42	495	46	1823	119
	17	10	444	18	1538	58	18	484	38	1871	108
	18	23	428	34	1568	104	27	495	51	1880	132
/ü/	10	54	418	36	2120	159	49	460	44	2189	200
	11	63	418	36	2051	187	97	444	51	2101	209
	12	45	413	33	2006	168	109	444	43	2095	192
	13	67	396	43	1898	151	140	431	48	2095	244
	14	82	352	40	1768	161	123	427	39	2021	229
	15	78	346	35	1712	136	64	428	46	1931	171
	16	73	352	33	1732	131	100	422	46	1916	199
	17	28	350	30	1673	126	44	420	33	1909	179
	18	19	343	29	1714	56	41	403	23	1958	195

Joonis 2. Poiste (must joon) ja tüdrukute (hall joon) rõhuliste vokaalide formantsageduste F1 (alumised joonepaarid) ja F2 (ülemised joonepaarid) muutus sõltuvalt vanusest.

Tabelist 2 näeme, et vanuse kasvades nii poiste kui ka tüdrukute enamiku vokaalide formantsageduste väärtused alanevad (vt ka joonist 2). Suuremad formantsageduste muutused leiavad aset vanuses 10–15 aastat, kusjuures poiste formantsagedused alanevad kiiremini kui tüdrukute omad. Vanuses 15–18 on formandiväärtuste muutused väikesed ja vokaalid omandavad püsiva kvaliteedi, säilitades keelejuhtide individuaalsed erinevused. Teistest vokaalidest erinevaid arengumustreid näeme tüdrukute kõnes tagavokaalide /o/ ja /u/ puhul, kus F2 väärtused püsivad aastaid stabiilsed või isegi kasvavad ja F2 langus leiab aset alles alates 16. eluaastast.

Tüdrukutel on kõigi vokaalide formantsagedused kõrgemad kui samaealiste poiste vastavad väärtused, siiski pole 10–11-aastaste poiste ja tüdrukute erinevused enamikul vokaalidel statistiliselt olulised (10-aastaselt on oluline ainult /a/ F2 erinevus ($p < 0,05$), 11-aastaselt /a/ F1 ($p < 0,05$) ja /e/ F2 erinevus ($p < 0,001$)), formantsageduste erinevused muutuvad oluliseks alates 12.–13. eluaastast ($p < 0,05$ kuni $p < 0,001$).

2.1.1. Piirkondlikud erinevused

Keelejuhtide murdetaustast tulenevad erinevused on statistiliselt olulised keskkõrgete ja madalate vokaalide kvaliteedis. Ootuspäraselt eristusid Saaremaa keelejuhid, kes hääldasid /õ/-vokaali tagapoolsemana ja /ö/-vokaali eespoolsemana võrreldes teiste piirkondade keelejuhtidega. Saarlaste /õ/-vokaali kvaliteet osutus oluliselt erinevaks siiski ainult poiste häälduses võrdluses

Harjumaa ($p < 0,05$) ja Kagu-Eesti ($p < 0,01$) poistega ning /õ/-vokaali kvaliteet ainult tüdrukute kõnes ($p < 0,001$ võrdluses Harjumaa ja Kirde-Eestiga; $p < 0,05$ võrdluses Kagu-Eestiga). Saarlased eristusid Harjumaa keelejuhtidest ($p < 0,01$) ka /o/-vokaali kõrgema häälduse poolest. /e/-vokaali kvaliteet osutus erinevaks ($p < 0,05$) Harjumaa (/e/ hääldus madalaim) ja Kagu-Eesti (/e/ hääldus kõrgeim) tüdrukute kõnes.

Madalaid vokaale /a/ ja /ä/ hääldavad kõrgeimalt Saaremaa ning madalaimalt Harjumaa keelejuhid (/a/ $p < 0,001$; /ä/ $p < 0,01$ ainult Saaremaa ja Harjumaa tüdrukute võrdluses).

Nii poiste kui ka tüdrukute rühmas osutus mitmete vokaalide häälduserinevuses oluliseks murdetausta ja vanuse vastastikmõju. Detailsem analüüs aga näitas, et sama vanuserühma piires on keelejuhtide murdetaustast tingitud vokaalide kvaliteedivariatsioonid valdavalt statistiliselt ebaolulised.

2.1.2. Kestusastme mõju vokaalikvaliteedile

Sarnaselt täiskasvanute kõnes registreeritud tendentsile hääldada lühikesi rõhulisi vokaale tsentraalsemalt (st vokaalid paiknevad vokaaliruumi keskpunktile lähemal) ning pikki ja ülipikki vokaale perifeersemtalt (st vokaaliruumi tsentrist kaugemal) (Eek, Meister 1998; Lippus jt 2013) esineb sama hääldusmuster ka laste kõnes. Reeglina on ülipikk vokaal perifeersemt kui pikk vokaal, kuid valdavalt ei ole pika ja ülipika vokaali kvaliteedierinevused statistiliselt olulised.

Lühikesed kõrged vokaalid on hääldatud madalamalt kui vastavad pikad ja ülipikad vokaalid: /i/ ($p < 0,01$ lühike–pikk võrdluses ja $p < 0,001$ lühike–ülipikk võrdluses), /ü/ ($p < 0,05$ lühike–pikk võrdluses) ja /u/ ($p < 0,05$ lühike–pikk ja pikk–ülipikk võrdluses, $p < 0,001$ lühike–ülipikk võrdluses). F2-suunalised häälduserinevused on olulised ainult /i/-vokaalil ($p < 0,01$ lühike–pikk/ülipikk võrdluses).

Keskkõrgetest vokaalidest mõjutab kestusaste /ö/, /õ/ ja /o/ häälduskõrgust: mida lühem vokaal, seda madalam hääldus (/ö/ ja /õ/ $p < 0,01$ pikk–ülipikk võrdluses; /o/ $p < 0,01$ lühike–pikk/ülipikk võrdluses). Pikem kestusaste tingib ka /e/ ja /ë/ eespoolsema häälduse (/e/ $p < 0,05$ lühike–pikk/ülipikk võrdluses ja /ë/ $p < 0,001$ lühike–pikk/ülipikk võrdluses).

Lühikesi /a/- ja /ä/-vokaale hääldati kõrgemalt kui pikki ja ülipikki vokaale ($p < 0,01$).

2.2. Vokaalitrajektoorid

Vokaalide trajektooride pikkused (TL) akustilises ruumis on esitatud tabelis 3. Nii poistel kui ka tüdrukutel on suurimad vokaalide /i/ ja /e/ ning väikseimad /o/ ja /u/ TL-väärtused, kusjuures poiste TL-väärtused on alati suuremad tüdrukute vastavatest väärtustest. Vokaalide kvaliteedi arengulisi muutusi sõltuvalt keelejuhtide vanusest ja soost illustreerib vokaalitrajektooride graafiline esitus joonisel 3.

Tabel 3.

Poiste ja tüdrukute vokaalitrajektooride pikkused hertsides

Vokaal	Poisid	Tüdrukud
/i/	744 Hz	366 Hz
/e/	592 Hz	347 Hz
/ä/	504 Hz	297 Hz
/ü/	470 Hz	273 Hz
/ö/	418 Hz	220 Hz
/a/	328 Hz	169 Hz
/õ/	245 Hz	155 Hz
/o/	182 Hz	146 Hz
/u/	94 Hz	73 Hz

Joonis 3. Poiste (must joon) ja tüdrukute (hall joon) rõhuliste vokaalide asukoha muutus akustilises ruumis sõltuvalt vanusest. Täidetud ringid tähistavad vokaalide asukohti 10 ja 18 aasta vanuselt, seest tühjad ringid vahepealseid vanuseastmeid.

2.3. Vokaaliruumi suurus

Akustilise vokaaliruumi suurust sõltuvalt vanusest illustreerime nurgavokaalide asukoha muutusena F1–F2 teljestikus (joonis 4) ja vokaaliruumi pindala muutusena (joonis 5).

Joonis 4. Poiste (must pidevjoon) ja tüdrukute (hall kriipsjoon) akustilise vokaaliruumi piirid ja nurgavokaalide asukohad sõltuvalt vanusest. Jooniste vertikaaltelg on F1 sagedus (Hz) ja horisontaaltelg F2 sagedus (Hz), vanuserühma näitab arv horisontaaltelje kohal.

Joonis 5. Poiste (mustad ringid) ja tüdrukute (hallid ringid) akustilise vokaaliruumi pindala (VSA) sõltuvalt vanusest ning vastavad lineaarse regressiooni kõverad.

3. Arutelu

Artiklis esitatud vokaalide formantsageduste väärtused ja nende muutused sõltuvalt keelejuhtide vanusest ja soost peegeldavad arengulisi muutusi laste kõnetraktis – vanusega kasvab kõnetrakti pikkus ja sellest tulenevalt alanevad kõigi vokaalide formantsagedused ja akustilise vokaaliruumi pindala. Kui kõne põhitooni arengus (Meister, Meister 2017) on näha poistel ja tüdrukutel erinevaid arengumustreid (poistel kiire langus puberteedieas, tüdrukutel ühtlane langus), siis formantsageduste ealine arengumuster on poistel ja tüdrukutel sarnane, st nii poiste kui ka tüdrukute vokaalide formantsageduste peamised muutused toimuvad 10–15-aastaselt ja edasised muutused on väikesed. Kuna poiste kõnetrakt on pikem kui tüdrukutel, siis on poiste vokaalide formantsageduste väärtused alati madalamad kui tüdrukute vastavad väärtused. Sarnaselt formantsagedustega väheneb ka vokaaliruumi suurus, kuigi tüdrukutel on täheldatav selle mõningane kasv vanuses 16–18 aastat. Ka mitmes Ameerika inglise keelt kõnelevate katsealuste vokaalide akustikat käsitlevas uuringus on saadud sarnaseid tulemusi: formantsageduste väärtused ja vokaaliruumi suurus vähenevad järjekindlalt vanuses 5–15 aastat ja kasvavad pisut alates 16. eluaastast eelkõige tüdrukutel, vähemal määral ka poistel (Flipsen, Lee 2012; Lee jt 1999). Sellised akustilised variatsioonid osutavad kõnetrakti arengulistele iseärasustele, mida toetavad ka magnetresonants-tomograafia meetodil tehtud kõnetrakti mõõtmised. Nii on Tecumseh Fitch ja Jay Giedd (1999) leidnud, et 17–18-aastaste tüdrukute kõnetrakt on pikem (143,7 mm) kui 19–25-aastastel (138,8 mm), poiste kõnetrakti pikkuse erinevus kahes vanuserühmas on tunduvalt väiksem (155,7 mm vs. 155,4 mm); Vorperiani jt (2009) mõõtmistulemused näitavad, et tüdrukute kõnetrakti kogupikkus väheneb pärast 16. eluaastat eelkõige neeluõõne arengu (lühene-mise) tõttu.

Siinne eesti laste vokaalide formantsageduste statistiline analüüs näitas, et sooline erinevus vokaalide kvaliteedis muutub oluliseks valdavalt 12–13-aastaselt. See tulemus on kooskõlas Vorperiani jt (2009, 2011) andmetega, mille kohaselt on poiste ja tüdrukute kõnetrakti pikkus erinev samuti alates 12. eluaastast.

Vokaalitrajektooride pikkuste (tabel 3) võrdlus näitab, et suurima kvaliteedimuutuse teevad läbi eesvokaalid /i/ ja /e/, väikseimad muutused on aga tagavokaalide /u/ ja /o/ kvaliteedis. Nende erisuste põhjused võivad osalt peituda kõnetrakti eri piirkondade – suu- ja neeluõõne – erinevas kasvukiiruses (Vorperian jt 2009, 2011) ning nende piirkondade erinevas rollis ees- ja tagavokaalide hääldamisel.

Kõnetrakti anatoomilise arengu ja selle akustiliste omaduste vahelised seosed on oluliselt keerulisemad ja kindlasti mittelineaarsed, kuid kahtlemata ei saa vokaalikvaliteedis toimuvaid muutusi seletada ainult kõnetrakti arenguliste muutustega. Lisaks kõnetraktile mõjutavad vokaalide kvaliteedi arengut ka kõneldav keel, keelejuhi muredetaust (Fox, Jacewicz 2009; Jacewicz, Salmons 2011), sotsiolingvistilised faktorid (Pettinato jt 2016) jm.

4. Kokkuvõte

Eesti laste kõne vokaalide akustiline analüüs näitas, et vanuses 10–15 aastat poiste ja tüdrukute vokaalide formantsagedused ja akustilise vokaaliruumi suurus järjekindlalt alanevad ning vokaalid omandavad püsiva kvaliteedi vanuses 15–18 aastat. Vokaalide hääldamisel ilmnev sooline erinevus muutub statistiliselt oluliseks 12–13-aastaselt. Saadud tulemused on kooskõlas kõnetrakti anatoomilist arengut käsitlevate uuringutulemustega.

Suurima kvaliteedimuutuse teevad läbi vokaalid /i/ ja /e/, kõige vähem muutub vokaalide /u/ ja /o/ kvaliteet. Keelejuhtide murdetaustast tulenevalt eristusid eelkõige Saaremaa keelejuhid, kes hääldasid /õ/-vokaali tagapoolsemana ja /ö/-vokaali eespoolsemana võrreldes teiste piirkondade keelejuhtidega; lisaks esines ka muid piirkondlikke hääldusvariatsioone. Sarnaselt täiskasvanutega on ka laste kõnes lühikesed rõhulised vokaalid hääldatud tsentraalsemalt ning pikad ja ülipikad vokaalid perifeersemtalt.

Uurimistöö valmimist on toetanud Euroopa Liit Euroopa Regionaalarengu Fondi kaudu (Eesti-uuringute Tippkeskus) ja riikliku programmi „Eesti keeletehnoloogia 2011–2017” projekt EKT70 „Kõnekorpusarendus”.

Kirjandus

- Asu, Eva Liina, Lippus, Pärtel, Pajusalu, Karl, Teras, Pire 2016. Eesti keele hääldus. (Eesti keele varamu 2.) Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Bates, Douglas, Maechler, Martin, Bolker, Ben, Walker, Steve 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. – Journal of Statistical Software, kd 67, nr 1, lk 1–48.
- Boersma, Paul, Weenink, David 2018. Praat: doing phonetics by computer (6.0.43). <http://www.praat.org/> (8. IX 2018).
- Eek, Arvo 2008. Eesti keele foneetika I. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
- Eek, Arvo, Meister, Einar 1998. Quality of standard Estonian vowels in stressed and unstressed syllables if the feet in three distinctive quantity degrees. – Linguistica Uralica, kd 34, nr 3, lk 226–233.
- Fant, Gunnar 1960. Acoustic Theory of Speech Production. The Hague: Mouton.
- Fitch, Tecumseh W., Giedd, Jay N. 1999. Morphology and development of the human vocal tract: A study using magnetic resonance imaging. – Journal of the Acoustical Society of America, kd 106, nr 3, lk 1511–1522.
- Flipsen, Peter J. R., Lee, Sungbok 2012. Reference data for the American english acoustic vowel space. – Clinical Linguistics & Phonetics, kd 26, nr 11–12, lk 926–933.
- Fox, Robert A., Jacewicz, Ewa 2009. Cross-dialectal variation in formant dynamics of American English vowels. – Journal of the Acoustical Society of America, kd 126, nr 5, lk 2603–2618.
- Jacewicz, Ewa, Salmons, Joseph 2011. Vowel change across three age groups of speakers in three regional varieties of American English. – Journal of Phonetics, kd 39, nr 4, lk 683–693.

- Lee, Sungbok, Potamianos, Alexandros, Narayanan, Shrikanth 1999. Acoustics of children's speech: Developmental changes of temporal and spectral parameters. – *Journal of the Acoustical Society of America*, kd 105, nr 3, lk 1455–1468.
- Lippus, Pärtel, Asu, Eva Liina, Teras, Pire, Tuisk, Tuuli 2013. Quantity-related variation of duration, pitch and vowel quality in spontaneous Estonian. – *Journal of Phonetics*, kd 41, nr 1, lk 17–28.
- McCloy, Daniel R. 2016. *phonR: tools for phoneticians and phonologists*. R package version 1.0-7.
- McDougall, Kirsty, Nolan, Francis 2007. Discrimination of speakers using the formant dynamics of /u:/ in British English. – 16th International Congress of Phonetic Sciences, Saarbrücken, Germany, 6–10 August, Proceedings. Toim Jürgen Trouvain, William J. Barry. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, lk 1825–1828.
- Meister, Einar, Meister, Lya 2017. Eesti laste kõne I. Põhitooni akustiline analüüs. – *Keel ja Kirjandus*, nr 7, lk 518–533.
- Perry, Theodore L., Ohde, Ralph N., Ashmead, Daniel H. 2001. The acoustic bases for gender identification from children's voices. – *Journal of the Acoustical Society of America*, kd 109, nr 6, lk 2988–2998.
- Pettinato, Michèle, Tuomainen, Outi, Granlund, Sonia, Hazan, Valerie 2016. Vowel space area in later childhood and adolescence: Effects of age, sex and ease of communication. – *Journal of Phonetics*, kd 54, nr 1, lk 1–14.
- R Core Team 2018. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: The R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/> (18. III 2019).
- RStudio Team 2015. *RStudio: Integrated Development for R*. Boston, MA: RStudio, Inc. <http://www.rstudio.com/> (18. III 2019).
- Stevens, Kenneth N. 2000. *Acoustic Phonetics*. Cambridge, MA–London: The MIT Press.
- Türk, Helen, Asu, Eva Liina, Lippus, Pärtel, Niit, Ellen 2016. Diftongidest ja triftongidest eesti keeles Kihnu vokaalisüsteemi näitel. – *Keel ja Kirjandus*, nr 1, lk 1–12.
- Vorperian, Houri K., Kent, Ray D. 2007. Vowel acoustic space development in children: A synthesis of acoustic and anatomic data. – *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, kd 50, nr 6, lk 1510–1545.
- Vorperian, Houri K., Wang, Shubing, Chung, Moo K., Schimek, E. Michael, Durtschi, Reid B., Kent, Ray D., Ziegert, Andrew J., Gentry, Lindell R. 2009. Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study. – *Journal of the Acoustical Society of America*, kd 125, nr 3, lk 1666–1678.
- Vorperian, Houri K., Wang, Shubing, Schimek, Durtschi, Reid B., Kent, Ray D., Gentry Lindell R., Chung, Moo K. 2011. Developmental sexual dimorphism of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study. – *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, kd 54, nr 4, lk 995–1010.
- Whiteside, Sandra P., Hodgson, Carolyn 2000. Speech patterns of children and adults elicited via a picture-naming task: An acoustic study. – *Speech Communication*, kd 32, nr 4, lk 267–285.

Einar Meister (snd 1957), PhD, Ida-Sooime ülikool, külalisprofessor, einar.meister@uef.fi; Tallinna Tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituudi vanemteadur (Akadeemia tee 21B, CYB-314, 12618 Tallinn), einar@ioc.ee

Lya Meister (snd 1957), PhD, Tallinna Tehnikaülikooli tarkvarateaduse instituudi teadur (Akadeemia tee 21B, CYB-315, 12618 Tallinn), lya@phon.ioc.ee

Estonian adolescent speech II: Acoustic analysis of vowels

Keywords: Estonian vowels, formant frequencies, vowel trajectory length, vowel space area, age, gender-related variations

The paper reports the results of an exploratory study on the acoustic characteristics of vowels depending on the subject's age and gender. The research material consists of a subset of read speech samples derived from the Estonian Adolescent Speech Corpus: 21 utterances per subject produced by 173 girls and 132 boys in the age range of 10 to 18 years.

The results show that both the formant frequencies and the vowel space area decrease gradually from 10 to 15 years in both gender groups and the quality of vowels stabilizes at the age of 15–18 years, whereas gender-specific differences emerge at the age of 12–13. These findings are in line with studies addressing the anatomical development of the vocal tract.

Age-related changes in vowel quality turned out to be the largest in vowels /i/ and /e/ and the smallest in vowels /u/ and /o/. The dialectal background of the subjects from Saaremaa was manifested by a more backward production of the /õ/-vowel and by a more fronted production of /ö/. Similarly to adult speech, adolescent speakers produce short stressed vowels more centrally than long and overlong vowels.

Einar Meister (b. 1957), PhD, University of Eastern Finland, Professor (pro tem), einar.meister@uef.fi; Tallinn University of Technology, School of Information Technologies, Senior Research Scientist (Akadeemia tee 21B, CYB-314, 12618 Tallinn), einar@ioc.ee

Lya Meister (b. 1957), PhD, Tallinn University of Technology, School of Information Technologies, Research Scientist (Akadeemia tee 21B, CYB-315, 12618 Tallinn), lya@phon.ioc.ee