

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
MATEMAATIKA JA STATISTIKA INSTITUUT

Uku Siim Timmusk
**Vaibla Linnujaama lindude mõõtmisandmete
analüüs**

Matemaatiline Statistika
Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendajad: PhD Märt Möls
MSc Kristjan Adojaan

TARTU 2025

VAIBLA LINNUJAAMA LINDUDE MÕÕTMISANDMETE ANALÜÜS

Bakalaureusetöö

Uku Siim Timmusk

Lühikokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli uurida Vaibla linnujaama andmete põhjal mõõtjatevahelisi erinevusi ja leida tegureid, mis võivad mõjutada tiivapikkuse mõõtmistulemusi. Analüüs näitas, et suitsupääsukeste tiivapikkuse ja massi vahel esineb mittelineaarne seos ning 11 mõõtjal esines mõõtmistes statistiliselt oluline nihe võrreldes kogunud mõõtjaga. Samuti leiti, et väiksema kogemusega mõõtjatel on kalduvus mõõta tiivapikkust lühemaks. Dispersioonikomponentide analüüsist selgus, et hajuvusallikad varieeruvad liigiti, kus väiksemate lindude puhul on juhusliku vea osakaal suurem. Tulemused viitavad, et kogemus ja linnu suurus mõjutavad tiivapikkuse mõõtmiste täpsust, pakkudes seeläbi olulist sisendit mõõtmismetoodikate täiendamiseks.

CERCS teaduseriala: P160 Statistika, operatsioonianalüüs, programmeerimine, finants- ja kindlustusmatemaatika.

Märksõnad: mõõtmistäpsus, dispersioonikomponendid, tiivapikkuse mõõtmine, suitsupääsuke, juhuslik viga

**ANALYSIS OF BIRD MEASUREMENT DATA FROM VAIBLA
BIRD OBSERVATORY**

Bachelor thesis

Uku Siim Timmusk

Abstract

The aim of this study was to investigate the differences between ringers based on data from Vaibla Bird Observatory and to identify factors that may affect wing length measurements. The analysis revealed a nonlinear relationship between the wing length and mass of barn swallows, as well as a statistically significant bias in the measurements of 11 ringers compared to an experienced ringer. It was also found that less experienced ringers tend to measure wings shorter than they actually are. The variance component analysis showed that the sources of measurement variation differ between species, with smaller birds exhibiting a higher proportion of random error. These results suggest that both experience and bird size influence the accuracy of wing length measurements, providing important insights for improving measurement methodologies.

CERCS research specialisation: P160 Statistics, operations research, programming, financial and actuarial mathematics.

Key Words: measurement accuracy, variance components, wing length measurement, barn swallow, random error

Sisukord

1	Kasutatud andmestik	7
1.1	Ülevaade andmestikust	7
1.2	Tiiva mõõtmine	10
2	Statistiline metoodika	11
2.1	Täpsus, kordustäpsus ja nihe	11
2.2	Ühe faktoriga dispersionanalüüsi mudel	12
2.3	Mudelimaatriks	13
2.3.1	Näide kordusmõõtmiste vahede mudelist	14
3	Andmeanalüüs	16
3.1	Suitsupääsukeste tiivapikkused sõltuvalt mõõtjast	16
3.2	Tiiva pikkuse modelleerimine massi põhjal	18
3.3	Mõõtjate eripära hindamine kordusmõõtmiste põhjal	18
3.4	Sisestaja kogemuse ja individuaalse mõju hindamine mõõtmistele	20
3.5	Ennustatav tiivapikkus sõltuvalt massist ning mõõtjast	23
3.5.1	Kordusmõõtmiste vajadus mõõtja nihke tuvastamiseks	25
3.6	Dispersioonkomponentide mudel	26
3.6.1	Liigisisene mõju hajuvusele	27
3.7	Kordustäpsuse kontroll mõõtjatel	30
	Kokkuvõte	32
	Kasutatud allikad (BIBLATEXiga)	33

Lisa 1: Kordusmõõtmiste eripärade mudeli väljund 34

Lisa 2: Kordusmõõtmiste eripärade suitsupääsukeste mudeli väljund 37

Sissejuhatus

Lindude mõõtmine, sealhulgas tiivapikkuse, massi ja teiste tunnuste fikseerimine, on lindude uurimisel üks olulisemaid osasid. Nende rõngastamine ja mõõtmine võimaldab uurida populatsioonide tervist, jälgida rändeid, analüüsida liigi vastupidavust keskkonnamuutustele ning annab olulise ülevaate liigist tervikuna (Bairlein, 2001). Vaibla linnujaam, mis on olnud oluline rõngastuskeskus Eestis, kogub igal aastal hulgaliselt andmeid erinevatelt linnuliikidelt, talletades mõõtmiseid oma andmebaasidesse, pakkudes võimalust uurida mõõtjate vahelisi erinevusi ja kordustäpsust.

Lindude mõõtmise puhul on oluline, et mõõtmised oleksid järjepidevad ja täpsed, sõltumata mõõtjast (Harnos, Fehérvári ja Csörgő, 2015). Eriti tähtis on see tiivapikkuse mõõtmisel, mis nõuab mõõtja kindlat kätt ja oskust lindu õigesti käsitseda. Vaatamata põhjalikule koolitusele ja standardiseeritud meetoditele võivad mõõtjate vahel esineda erinevused nii süsteemse kui ka juhusliku vea osas.

Käesoleva töö eesmärgiks on analüüsida lindude tiivapikkuste mõõtmisi Vaibla linnujaamas, keskendudes erinevate mõõtjate täpsusele ja kordustäpsusele. Peamiselt kasutatakse analüüsiks suitsupääsukesti, et vältida liigi mõju mõõtmistele ning kuna neid on kõige rohkem mõõdetud - valdav osa mõõtjatest on neid mõõtnud. Uuringus hinnatakse, kas mõõtjate vahel esineb süstemaatilisi erinevusi, kuivõrd mõjutab mõõtjate kogemus mõõtmistulemuste täpsust ning millisel määral avaldub liigisisene varieeruvus. Lisaks käsitletakse massi ja mõõtmistulemuste vahelisi seoseid, et selgitada välja, kas mõõtmise täpsus sõltub ka mõõdetava linnu suurusest. Töö tulemused võivad aidata parandada mõõtmiste usaldusväärsust ja ühtlust erinevate mõõtjate vahel, vähendades võimalikke süstemaatilisi vigu.

Töö esimeses peatükis on ülevaade andmetest ning andmestikust ja tiiva mõõtmise metoodika tutvustus. Töö teises peatükis on selgitatud töös kasutatud statistilist metoodikat ning termineid. Töö viimases peatükis on kirjeldatud tehtud analüüs ning nende tulemused.

Autor tänab bakalaureusetöö juhendajaid Märt Mölsi ja Kristjan Adojaani nõuan-
nete ja paranduste eest.

1 Kasutatud andmestik

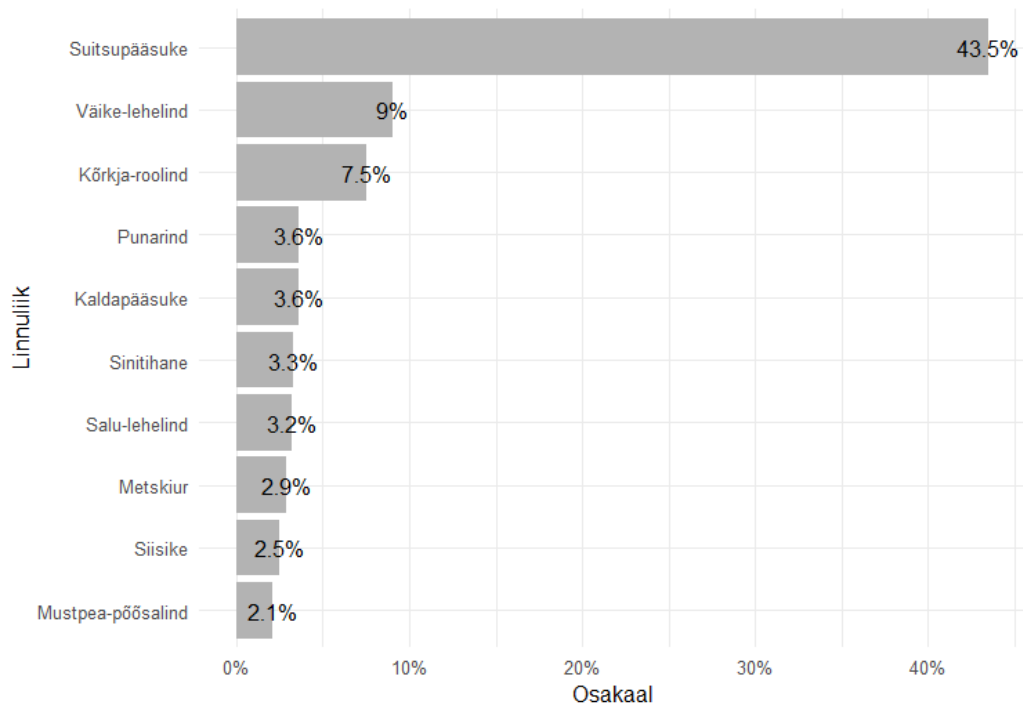
Analüüsiks kasutatavad andmed on kogutud Vaibla Linnujaamas aastatel 2023 ja 2024. Linnujaamas märgistatakse igal aastal juulist septembrini rändel olevaid väikseid värvulisi. Märgistamisega koos mõõdetakse lindudel nende tiivapikkus ning linnud ka kaalutakse. Andmed salvestatakse andmebaasis ning need on seejärel kättesaadaval Google Sheets-is. Mõned linnud satuvad võrkudesse korduvalt, nad mõõdetakse ja kaalutakse uuesti ning pannakse eraldi korduspüükide tabelisse kirja.

Andmeväljad, mis talletatakse:

- Rõnga seeria ja unikaalne number,
- liik,
- vanus koodidena (noor, vana, teadmata),
- sugu,
- asukoht (kõigil sama),
- rõngastamise kuupäev ja kellaaeg,
- tiiva pikkus,
- kehamass,
- rõngastaja,
- Osadel liikidel ka *notch* ehk teise labahoosule siseserva kõverdumine.

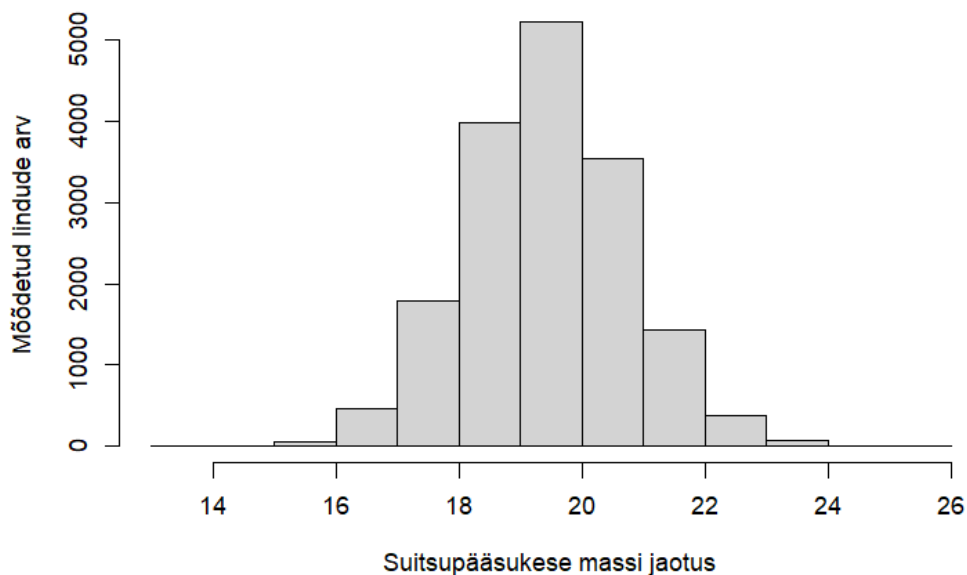
1.1 Ülevaade andmestikust

Aastal 2023 märgistati 21 940 lindu ning 1226 kordusmõõtmist, aastal 2024 märgistati 18 184 lindu ning 828 kordusmõõtmist. Kümme kõige rohkem esinevat linnuliiki moodustavad kõikidest mõõtmistest 81% ning nende osakaalud on kujutatud järgneval joonisel (1):



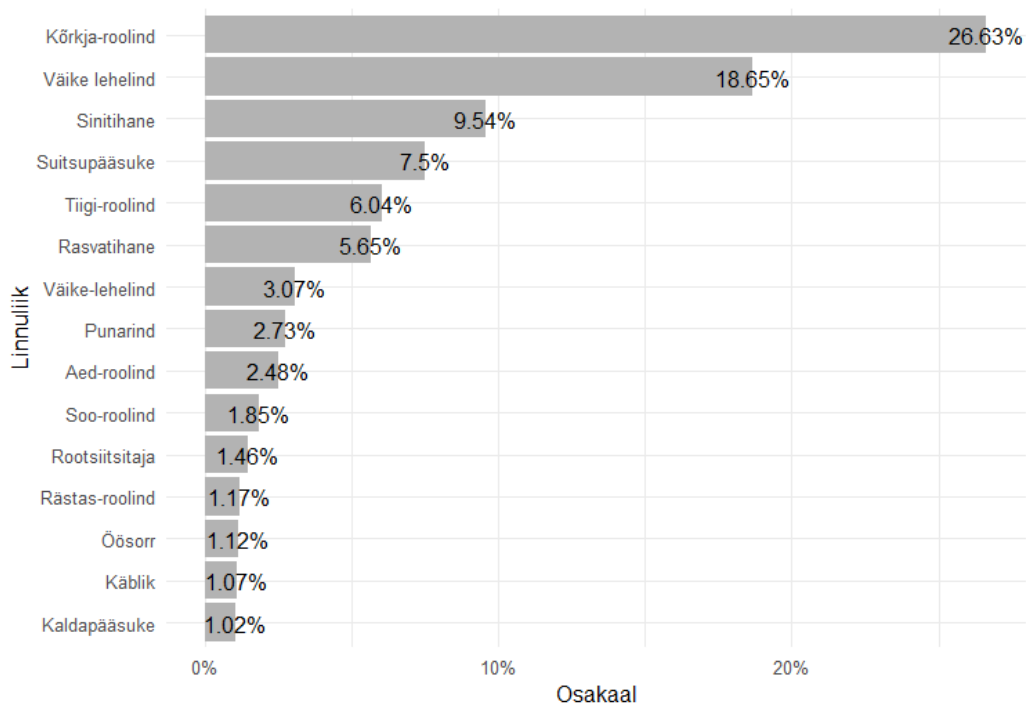
Joonis 1: Linnuliikide jaotus andmestikus

Analüüsis tuleb kasutada väga palju ka linnu massi mudelites kirjeldamiseks tiivapikkuse mõõtmiseid. Järgneval joonisel (2) on kujutatud suitsupääsukeste massi jaotus:



Joonis 2: Suitsupääsukeste massi histogramm

Kordusmõõtmistes liikide osakaalud erinevad oluliselt kõikide mõõtmiste osakaaludest. Näiteks suitsupääsuke pole enam pikalt esimene vaid hoopis kõrkja-roolind on. Erinevus on tingitud sellest, et suitsupääsukesed peatuvad rände ajal roostikus enamasti vaid üheks ööks ja liiguvad edasi, roolinnud, aga on pikemat aega paigal ja toituvad, selleks et järgmiseks rändeliikumiseks rasva koguda. Kõige rohkem mõõdeti sama isendit 8. erineval korral. Tulevasel joonisel (3) on kujutatud 15 enim kordusmõõdetud lindude osakaale:



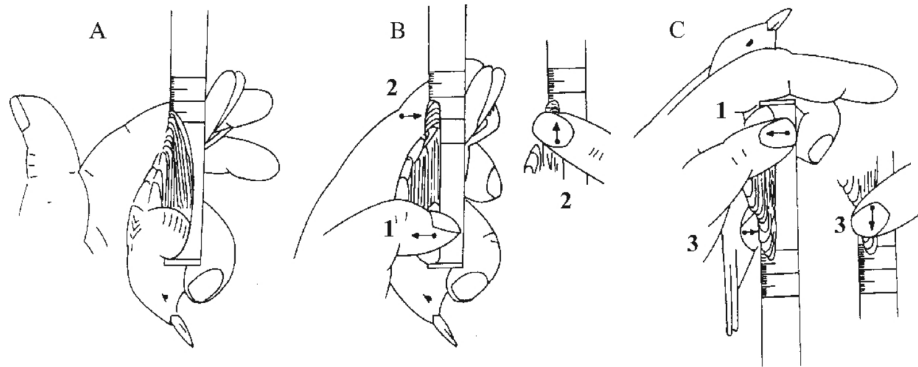
Joonis 3: Kordusmõõtmiste enim mõõdetude osakaalude jaotus

1.2 Tiiva mõõtmine

Linnu tiiba mõõdetakse joonlaua abil maksimummeetodil.

Maksimummeetod: Tiib peab olema kokku volditud „puhkeasendis“ (4, A). Alustuseks surutakse tiib ettevaatlikult vastu joonlauda, avaldades kergelt survet kattesulgedele. Seejärel sirgendatakse kattesulgi pöidlaga (4, B ja C), kuni need on paralleelsed joonlauaga. Sulgede asendit on võimalik kohandada vabade sõrmedega.

Sirgendatud tiiba hoitakse jätkuvalt joonlaua vastu surutuna ning kattesulgi silutakse väljapoole suunatud pöidlatõmmetega. Tiiva painutuspunkti ei tohi liigutada nullpunktist eemale. Tuleb vältida liigset jõudu ning peab olema võimalikult ettevaatlik, et mitte vigastada tiivaluid ja -lihaseid.



Joonis 4: Maksimummeetod, Allikas: Busse ja Meissner, 2016

Mõõta võib nii vasakut kui paremat tiiba. Mõõtmiseks kasutatakse standardseid joonlaudu.

2 Statistiline metoodika

2.1 Täpsus, kordustäpsus ja nihe

Täpsus (*accuracy*) ning kordustäpsus (*precision*) on statistikas kasutatavad terminid, millega on võimalik hinnata uuringu tulemuste headust. Täpsus näitab uuringu tulemuste puhul seda, kui lähedale on saadud väärtused keskmiselt päris väärtusele. Kordustäpsus kirjeldab saadud tulemuste hajuvust (Yellowlees, 2021).

Näiteks, olgu meil ajaloolistest andmetest teada, et keskmiselt on täiskasvanud suitsupääsukese tiivapikkus 12,5 cm ning vaatleme tulemusi kahelt erinevalt mõõtjalt, kes mõlemad mõõtsid kolm korda samast liigist linde, aga erinevaid isendeid. Esimene mõõtja sai mõõtmistulemuseks: 12,3 cm, 11,7 cm ja 13,2 cm ning teise mõõtmistulemused olid: 11,8 cm, 11,7 cm ja 12 cm. Mõõtmistulemustest on näha, et esimene mõõtja on täpne, kuid ei ole kordustäpne ning teine mõõtja on kordus-

täpne kuid täpsus on madal. Teise mõõtja puhul on ka näha, et ta mõõdab tiiva süstemaatiliselt lühemaks kui see tegelikkuses on, ehk esineb nihe (*bias*).

2.2 Ühe faktoriga dispersionanalüüsi mudel

Peatükk põhineb Tartu Ülikooli kursuse andmeanalüüs 2 konspektil (Käärik, 2013).

Dispersionanalüüsis on:

- uuritav (sõltuv) tunnus pidev arvtunnus,
- argumenttunnused diskreetsed nn faktortunnused.

Faktortunnus jaotab uuritava tunnuse klassideks (rühmadeks), faktortunnuse erinevaid väärtusi nimetatakse tasemeteks. Eeldatakse, et tasemete arv k ei ole väga suur. Hinnatakse faktori mõju uuritavale tunnusele, mis seisneb rühmade keskväärtuste võrdlemises.

Kahe keskväärtuse võrdlemisel kasutatakse t-testi, aga kui tasemete arv ($k > 2$), on keskväärtuste võrdlemisel kasutusel dispersionanalüüsi meetodid. Olgu meil k üldkogumit keskväärtustega μ_1, \dots, μ_k (ehk meil on faktortunnus, mis jagab üldkogumi k osaks). Siis mitme keskväärtuse võrdlemise ülesanne tähendab järgmise hüpoteesipaari kontrolli:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k, \quad \text{keskväärtused on võrdsed,}$$

$$H_1 : \exists i, j \quad \text{nii, et} \quad \mu_i \neq \mu_j \quad \text{leidub erinevaid keskväärtusi.}$$

Üldkogumite võrdlemiseks peab olema igast üldkogumist valim, st igal faktori tasemel peab olema tehtud sõltuva tunnuse mõõtmisi. Olgu y_{ij} uuritava sõltuva tunnuse väärtus i -ndas üldkogumis, j -ndal objektil, kusjuures $i = 1, \dots, k$ ja $j = 1, \dots, n_i$ (rühmade suurused ei pea olema üldjuhul võrdsed).

Mõõtmistulemused saab esitada mudeliga:

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij},$$

kus ε_{ij} on juhuslik mõju. Mudel esitab erineva keskväärtusega mõõtmistulemused, kuid ei kajasta keskväärtuste erinevuste põhjuseid.

Faktortunnuse mõju uurimiseks esitatakse mudel kujul:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij},$$

kus y_{ij} on uuritava tunnuse väärtus ($i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n_i$), μ tähistab üldkeskmist ning α_i on faktori i -nda taseme poolt põhjustatud kõrvalekalle üldkeskmisest ($\alpha_i = \mu_i - \mu$). Ühesuse tagamiseks kehtib kitsendus:

$$\sum_{i=1}^k \alpha_i = 0.$$

Hüpoteesid on järgmised:

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0 \quad (\text{faktortunnusel puudub mõju});$$

$$H_1 : \exists i, \quad \alpha_i \neq 0 \quad (\text{faktortunnusel on mõju}).$$

2.3 Mudelimaatriks

Analüüsi käigus tekkis soov kontrollida läbi kordusmõõtmiste, kas mõni mõõtja kipub süstemaatiliselt tiivapikkust üle- või alahindama. Selleks võrreldi iga linnu esimest mõõtmist kordusmõõtmisega ning arvutati nende vahe. Analüüsi eesmärk oli teada saada, kas mõõtjate vahel esineb erinevusi, mis võiksid viidata nihkele mõõtmistes.

Iga mõõtmist saab kirjeldada järgmiselt:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij},$$

kus y_{ij} on i -nda mõõtja j -nda linnu tiivapikkus, μ on suitsupääsukeste keskmine tiivapikkus, α_i on mõõtja mõju ning ε_{ij} juhuslik viga.

Lahutades esmasest mõõtmisest kordusmõõtmise, saame mudeli kujul:

$$\hat{y}_i = y_{i1} - y_{i2} = \alpha_{i1} - \alpha_{i2} + \epsilon_i,$$

kus y_{i1} on algne mõõtmine, y_{i2} kordusmõõtmine, α_{i1} ja α_{i2} vastavate mõõtjate mõjud ning ϵ_i kahe mõõtmise ($\varepsilon_{1i} - \varepsilon_{2i}$) kombineeritud juhuslik viga.

Niimoodi kirja pandud vahed saab kirjeldada maatrikskujul:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon},$$

kus:

- $\hat{\mathbf{y}}$ on $n \times 1$ mõõtmistulemuste vahede vektor,
- \mathbf{X} on $n \times p$ mudelimaatriks, kus igal real on täpselt üks $+1$ ja üks -1 , vastavalt mõõtjatele,
- $\boldsymbol{\beta}$ on mõõtjate mõjude vektor,
- $\boldsymbol{\epsilon}$ on juhuslike vigade vektor.

Selline mudel võimaldab hinnata, kas mõni mõõtja kaldub süstemaatiliselt mõõtma tiiba pikemaks või lühemaks võrreldes teistega.

2.3.1 Näide kordusmõõtmiste vahede mudelist

Näiteks, olgu meil olemas kolme suitsupääsukeste tiivapikkuse mõõtmised ning igat lindu on mõõdetud kahel korral kahe erineva rõngastaja poolt:

- lind 1: mõõtjad **A** ja **B**,
- lind 2: mõõtjad **A** ja **C**,
- lind 3: mõõtjad **B** ja **C**.

Mõõtmistest tekitame soovitud kujul vahed:

$$\hat{y}_1 = y_{11} - y_{12}, \quad \hat{y}_2 = y_{21} - y_{22}, \quad \hat{y}_3 = y_{31} - y_{32}.$$

Eeldame, et igal mõõtjal on oma eripära, mis mõjutab mõõdetud tiivapikkust. Sellisel juhul on iga vahe kirjeldatav kahe mõõtja mõju vahena, koos juhusliku veaga:

$$\hat{y}_1 = \alpha_A - \alpha_B + \epsilon_1,$$

$$\hat{y}_2 = \alpha_A - \alpha_C + \epsilon_2,$$

$$\hat{y}_3 = \alpha_B - \alpha_C + \epsilon_3.$$

Kirjutades selle maatrikskujul:

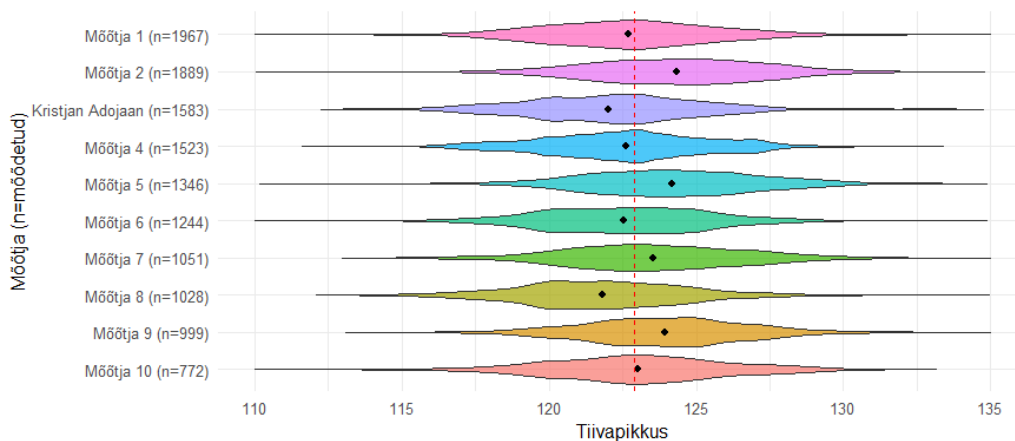
$$\hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_A \\ \alpha_B \\ \alpha_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix}.$$

Maatriksis \mathbf{X} tähistab igas reas 1 mõõtmise esimest ja -1 teist mõõtjat. Vektor $\boldsymbol{\alpha}$ sisaldab iga mõõtja mõju, mida soovime hinnata.

3 Andmeanalüüs

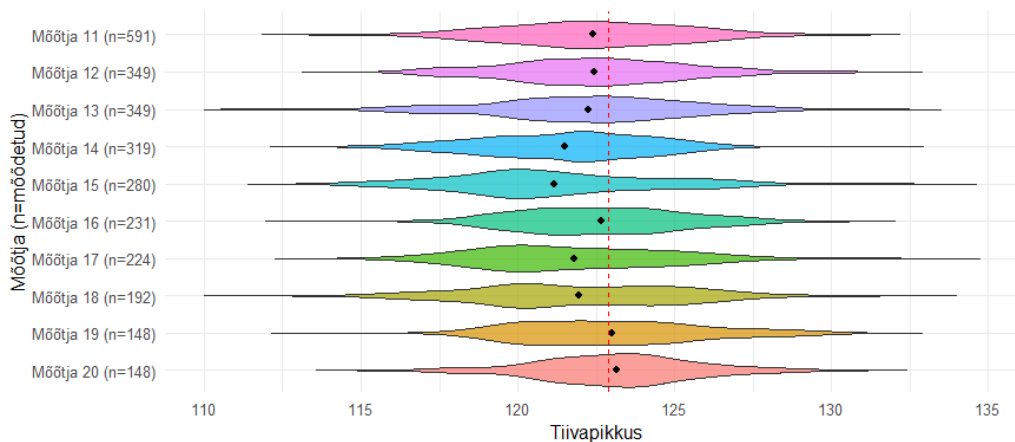
3.1 Suitsupääsukeste tiivapikkused sõltuvalt mõõtjast

Enamik Vaibla linnujaamas püütud lindudest on suitsupääsukesed, mistõttu on huvi kontrollida nende tiivapikkuste mõõtmistulemuste jaotust erinevatel mõõtjatel, et leida kas esineb erinevusi. Selleks on valitud aastal 2024 esimesed 30 kõige enam suitsupääsukesti mõõtnud inimest ning grupeeritud nad 3 gruppi mõõdetud lindude arvu järgi.



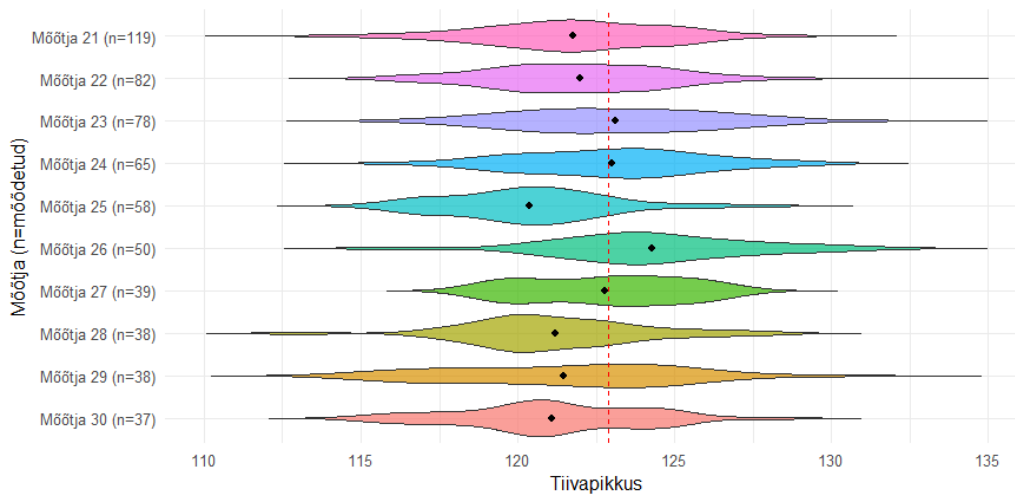
Joonis 5: Eksperdid

Esimene grupp koosneb kõige kogenumatest, kelle puhul on näha, et jaotused on üldiselt sarnased ja vaatluste ulatus on kõige suurem võrreldes teiste gruppidega, mis on tingitud rohketest vaatlustest (5). Mustad täpid graafikul tähistavad keskmisi väärtusi ning punane katkendlik joon tähistab andmete põhjal arvatud suitsupääsukeste keskmist tiivapikkust.



Joonis 6: Osavad

Teises grupis, kus on veidi vähem kogenud mõõtjad, ei leidu ka väga suuri lahknevusi ning jaotus on kõigil sarnane (6).



Joonis 7: Algajad

Kõige väiksema mõõtmiskogemusega grupis hakkame nägema suuremaid lahknevusi (7). Andmemahud on ka võrdlemisi väiksed, mis veel omakorda soosib suuri erinevusi. Joonistelt on näha, et jaotused ei ühti enam nii väga ning mõõtmiste ulatus on kõige väiksem. Joonistelt loeb veel välja, et algajad ja osavad kipuvad pigem mõõtma tiiba üldkeskmisest lühemaks.

3.2 Tiiva pikkuse modelleerimine massi põhjal

Eesmärgiks oli ka hinnata, kui suure osa tiiva pikkuse hajuvusest on võimalik ära kirjeldada linnule omaste tunnustega. Selle eesmärgiga koostati algselt mudel, mis sisaldas lisaks kehamassile ka isendi sugu ja vanust.

Kahjuks on enamuse lindude puhul soo ja vanuse määramine keeruline ning vastavad andmed puudusid suurel hulgal isenditest. Seetõttu keskenduti lihtsustatud mudelile, mis prognoosib tiiva pikkust üksnes massi põhjal. Kuigi esialgne lineaarne mudel osutus statistiliselt oluliseks, tekkis kahtlus, et tunnustevaheline suhe ei ole lineaarne, mistõttu lisasiti mudelisse massi kõrgema astme liikmed. Tekkinud mudel oli kujul:

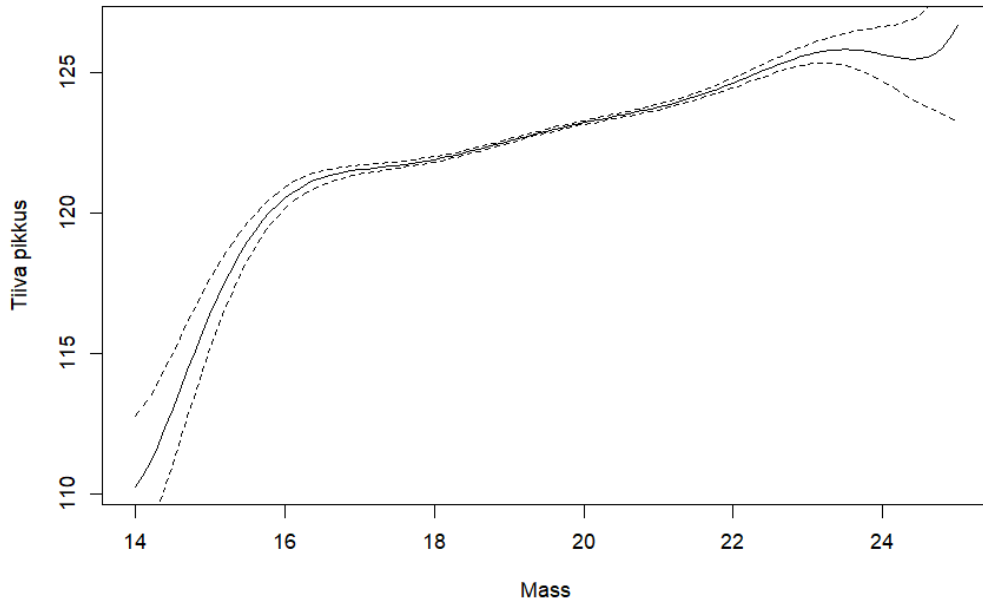
$$\begin{aligned} \text{Tiiva pikkus} = & 123 + 110.5M + 1.3M^2 + 11.5M^3 - 10.7M^4 \\ & + 4.5M^5 - 1.4M^6 - 7.7M^7 + 12.1M^8 + \varepsilon, \end{aligned}$$

Massi ja tiivapikkuse vaheline suhe on välja toodud järgneval joonisel (8) graafiliselt, koos 95% usalduspiiridega.

Antud andmestiku põhjal tehtud mudelis osutusid kõik peale kolmanda, viienda ja kuuenda massi astme, statistiliselt oluliseks, viidates mittelineaarsele seosele tiiva pikkuse ja massi vahel.

3.3 Mõõtjate eripära hindamine kordusmõõtmiste põhjal

Mõõtjate vaheliste süstemaatiliste erinevuste leidmiseks analüüsiti nende mõõtmiste ja samade isendite kordusmõõtmiste erinevusi. Analüüsi eesmärgiks oli selgitada välja, kas leidub mõni mõõtja, kelle mõõtmistulemustes esineb nihe, kuna ta kipub mõõtma tiivapikkust kas liiga lühikeseks või liiga pikaks.



Joonis 8: Tiivapikkuse mudel, koos 95% usalduspiiridega

Mudeli tegemiseks ühendati esmakordsed mõõtmised ja kordusmõõtmised individuaalse linnu koodi alusel. Välja jäeti kõik kirjed, kus mõlemal mõõtmisel puudus mingil põhjusel tiiva pikkus. Seejärel arvutati iga linnu kohta mõõtmiste vahe (esialgsest mõõtmisest lahutati kordusmõõtmine), mille alusel soovitigi hinnata mõõtjate süstemaatilist mõju.

Mõõtjate eripära hindamiseks konstrueeriti mudelimaatriks. Kuna iga vahe $\hat{y}_i = y_{i1} - y_{i2}$ sisaldas kahe mõõtja mõju, siis kodeeriti iga mõõtja veerg maatriksis nii, et:

- esialgse mõõtja vastavasse veergu lisati $+1$,
- kordusmõõtmise mõõtja veergu lisati -1 ,
- ülejäänud veerud jäeti nullideks.

Andmetest valiti välja ka kõige suurema kogemusega (rõngastatud lindude arvu

põhjal) mõõtja Kristjan Adojaan ning ta jäeti referentsväärtuseks, et saadud tulemused oleks paremini tõlgendatavad.

Moodustatud mudel oli kujul:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (1)$$

kus $\hat{\mathbf{y}}$ on mõõtmiste vahede vektor, \mathbf{X} on loodud mudelimaatriks ning $\boldsymbol{\beta}$ on mõõtjate eripärade vektor võrdluses referentsväärtusega ning $\boldsymbol{\epsilon}$ kombineeritud juhuslike vigade vektor.

Mudel osutus statistiliselt oluliseks, viidates sellele, et mõõtjate vahel leidis süsteemseid erinevusi mõõtmistulemustes. Mudeli väljundist selgus, et 47-st mõõtjast osutusid mudelis 11 tulemused statistiliselt oluliseks, mis tähendab, et nad kipuvad tiibade pikkust süstemaatiliselt pikemaks või lühemaks (sõltuvalt mõõtjast) mõõtma võrreldes Kristjan Adojaaniga. Positiivne kordaja tähendas, et vastav mõõtja mõõtis keskmiselt pikemalt, negatiivne aga lühemalt (vt. lisa 1).

See tulemus annab alust väita, et kuigi enamasti ei leidu mõõtjate vahel tulemustes suuri erinevusi, leidub selliseid mõõtjaid, kelle mõõtmistulemustes esineb nihe.

3.4 Sisestaja kogemuse ja individuaalse mõju hindamine mõõtmistele

Lisaks mõõtjate vahelise kordustäpsuse kontrollile tekkis huvi uurida, kas mõõtjate liigispetsiifiline kogemus või individuaalne eripära võib mõõtmistulemusi mõjutada. Eesmärgiks oli hinnata, kas:

- mõõtja järjestikune kogemus konkreetse liigi mõõtmisel mõjutab tiivapikkuse mõõtmistulemust,
- mõõtjate tulemuste vahel esineb süstemaatilisi erinevusi,

- mõõtjate mõju sõltub nende kogemustasemest (st. kas mõõtjate mõju ja kogemuse vahel esineb koostoimeid).

Iga mõõtmise kohta loodi tunnus hetkeliigikogemus, mis kirjeldab mõõtja varasemat mõõtmiskogemust konkreetse liigiga. Selle väärtus määrati loendades, mitu korda eelnevalt sellele ajahetkele oli vastav mõõtja konkreetset linnuliiki mõõtnud. Tulemuseks saadi igale mõõtmisele vastav number, mis tähistas mõõtja hetkelist kogemust mõõdetud liigiga.

Seejärel loodi kaks lineaarset mudelit:

- esimene mudel sisaldas lindude massi (8-nda astme polünoomina), mõõtjate mõju ja hetkeliigikogemuse mõju (3-nda astme polünoomina),

$$\text{Tiiva pikkus} = f(\text{Mass}) + g(\text{hetkeliigikogemus}) + \varepsilon,$$

kus f on 8-nda astme massist sõltuv polünoom ja g 3-nda astme hetkeliigikogemusest sõltuv polünoom ja ε on juhuslik viga

- teine mudel sisaldas lisaks ka koosmõju mõõtjate ja hetkeliigikogemuse vahel.

$$\text{Tiiva pikkus} = f(\text{Mass}) + g(\text{hetkeliigikogemus}, \text{Mõõtja}) + \varepsilon, \quad (2)$$

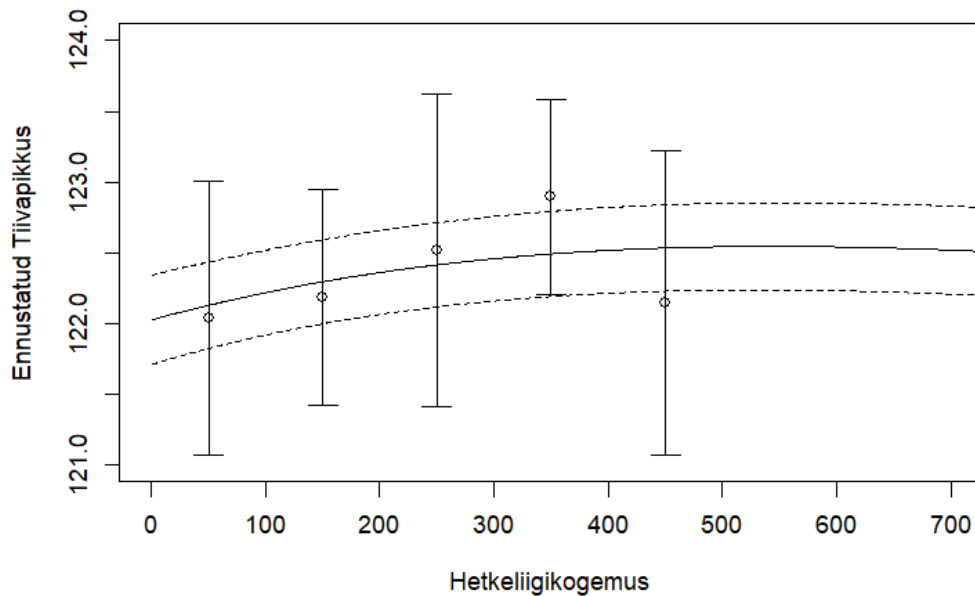
kus g tähistab iga mõõtja jaoks tehtud 3-nda astme hetkeliigikogemusest sõltuvat polünoomi.

Mõlemad mudelid osutusid statistiliselt oluliseks. Nii mõõtja kui ka talle vastav liigispetsiifiline mõõtmiskogemus ning nende vahelised koosmõjud osutusid oluliseks faktoriks tiivapikkuse mõõtmistulemustes. Koosmõju lisamine suurendas korrigeeritud determinatsioonikordajat (*Adjusted-R²*) ligikaudu 0.1 võrra, viidates sellele, et mõõtjate individuaalne mõju tulemustele sõltub ka nende kogemusest.

Koosmõju olulisust saab tõlgendada nii, et osade mõõtjate mõõtmistulemus võib muutuda täpsemaks kogemuse kasvades, samas kui mõne teise mõõtja puhul võib

sarnane kalduvus säilida ka pärast pikemat praktikat, ehk kõiki ei mõjuta hetkeliigikogemus sarnaselt.

Järgneval joonisel (9) on kujutatud fikseeritud sama massiga (20g) suitsupääsukeste ennustatavad tiivapikkuste mõõtmised koos 95%-usalduspiiridega hetkeliigikogemuse kasvades. Kujutatud mõõtmised oleksid tehtud konkreetse rõngastaja, mõõtja 13 poolt, kes valiti vältides „megakogenuid,“ kuna neil peaks mõõtmine hüpoteetiliselt olema piisavalt oskuslik, et nad ei peaks igal aastal seda uuesti õppima.



Joonis 9: Tiivapikkuse mudel sõltuvalt hetkeliigikogemusest

Joonisele (9) on veel lisatud 5 punkti, mis tähistavad iga järjestikuse 100 mõõtmise keskmist, koos vastavate usalduspiiridega, kinnitamaks seose oleamsolu. Joonis näitab, et tõepoolest mõõtja kogemuse kasvades mõõdetud tiivapikkuse väärtused suurenevad, jõudes ühel hetkel platooni, mil mõõtmised stabiliseeruvad.

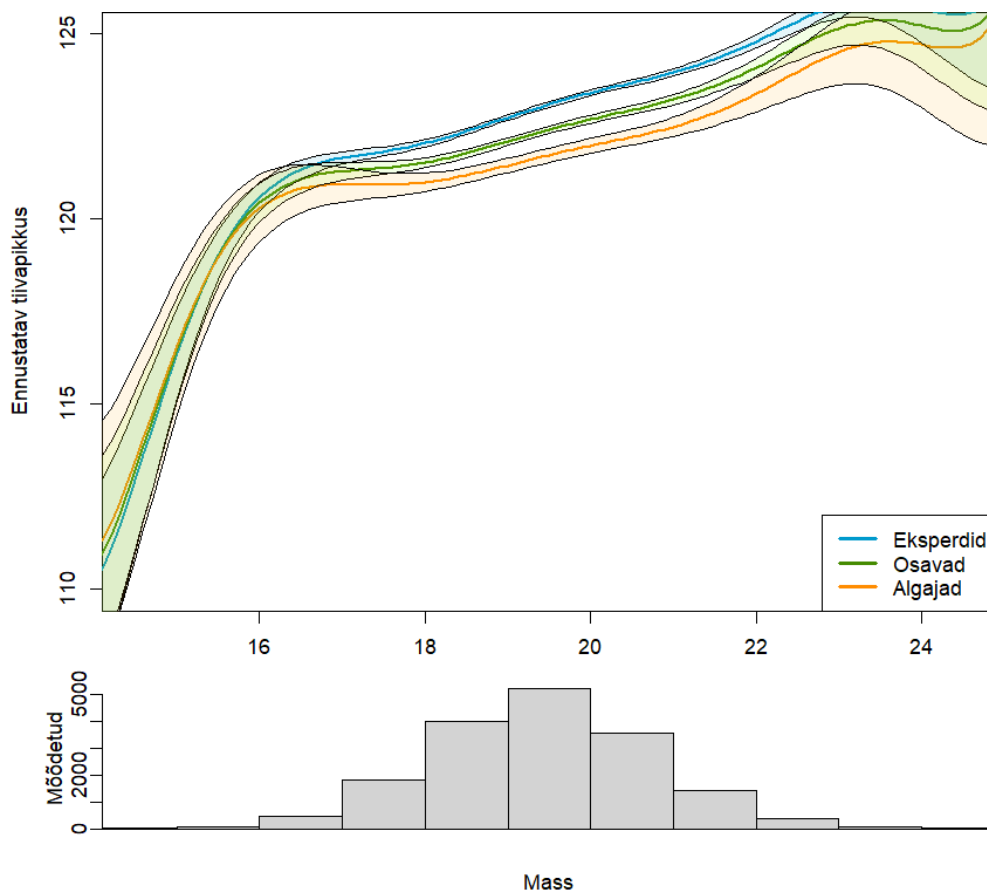
3.5 Ennustatav tiivapikkus sõltuvalt massist ning mõõtjast

Tiivapikkuse mõõtmisel kasutatav meetod (maksimummeetod) eeldab, et mõõtja „venitaks“ tiiba maksimaalselt sirgeks. Sellest lähtuvalt tekkis hüpotees, et mõõtmise täpsus võib sõltuda rõngastaja kogemusest – kogenumad mõõtjad julgevad tiiba rohkem venitada, samas kui algajad võivad olla ettevaatlikumad, põhjustades süstemaatilist tiivapikkuse alahindamist. Suurematel lindudel on pikem tiib, mida peab mõõtmiseks rohkem venitama. Selle hüpoteesi kehtides peaks algajatel viga olema suurem, mõõtes suuremaid linde.

Analüüsi jaoks valiti andmestikust 30 enim suitsupääsukesti mõõtnud rõngastajat. Mõõtjate kogemuse põhjal jagati nad süstemaatiliselt kümne kaupa kolmeks gruppiks: algajad, osavad ja eksperdid. Seejärel koostati lineaarne mudel, mis modelleeris tiivapikkust kehamassi põhjal. Mudelisse lisati veel koosmõju grupi ja massi vahel, et kontrollida hüpoteesi kehtivust, kas tiiva pikkuse sõltuvus massist erineb mõõtja kogemuse tasemest sõltuvalt. Mudeli lõplik kuju on järgnev:

$$\text{Tiiva pikkus} = f(\text{Mass}) + h(\text{Mass}, \text{Grupp}) + \varepsilon,$$

kus f on 8-nda astme massist sõltuv polünoom ja h on massi ja mõõtjate grupi vaheline koosmõju ja ε on juhuslik viga



Joonis 10: Suitsupääsukeste ennustatav tiivapikkus sõltuvalt massist

Visuaalseks võrdluseks ennustati mudeli järgi suitsupääsukeste tiivapikkuseid, iga-le mõõtjate grupile, kehamassi erinevate väärtuste puhul. Saadud tulemuste põhjal joonistati kolmest kõverast koos neile vastavate usalduspiiridega koosnev graafik (10), kus x -teljel on kehamass ja y -teljel ennustatav tiivapikkus. Iga grupi joonele vastab konkreetne värv: eksperdid (sinine), osavad (roheline) ja algajad (oranž). Jooniselt (10) on näha, et kuigi väiksemate lindude puhul tõepoolest on kõverad sarnased, muutuvad süstemaatilised erinevused massi kasvades palju märgatavamaks. Näiteks, algajate grupi ennustused on keskmiselt madalamad kui kogenumatel mõõtjatel. See gruppide vaheline sarnasus eriti väikeste ja eriti suurte pääsukeste puhul võib olla tingitud sellest, et antud masside juures on liiga vähe andmeid. See

tulemus toetab hüpoteesi, et mõõtja kogemuse kasvades muutub mõõtmine täpsemaks või vähemalt järjekindlamaks, et tõepoolest tekib mõõtjal kogemuse kasvades julgus linnu tiiba pikemaks „venitada“.

3.5.1 Kordusmõõtmiste vajadus mõõtja nihke tuvastamiseks

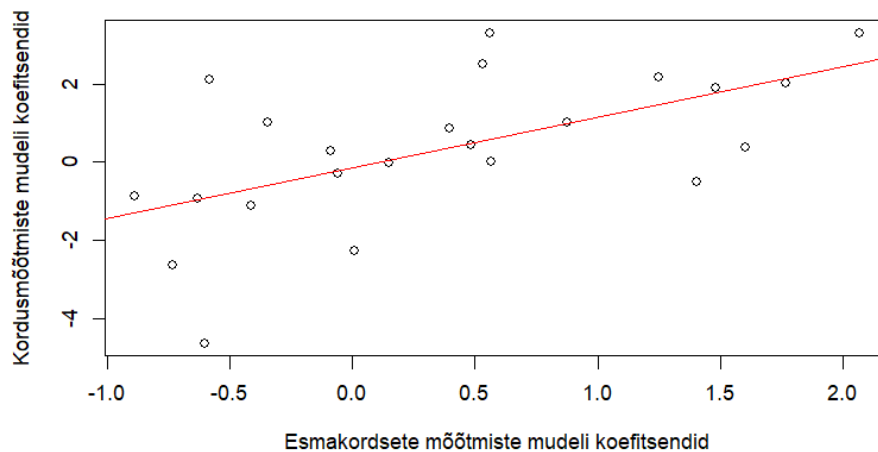
Tulemuste analüüsimisel tekkis küsimus, kas kordusmõõtmisi on vaja mõõtja mõõtmistes nihke tuvastamiseks ja hindamiseks. Püstitati hüpotees, et esmakordsetest mõõtmistest piisab mõõtja nihke hindamiseks ning kordusmõõtmised ei anna lisa informatsiooni. Mõõtja süstemaatilist viga suitsupääsukese tiivapikkuse hindamisel hinnati kahe mudeli abil:

- Tiiva pikkust ennustatakse linnu massi ja mõõtja süstemaatilise vea ($nih_{e_{mõõtmise}}$) abil, iga lindu on mõõdetud vaid üks kord (2).
- Kordusmõõtmiste mudel, kus modelleeritakse sama linnu kordusmõõtmiste erinevusi. Antud mudeli põhjal hinnatakse mõõtjate nihked ($nih_{e_{kordusmõõtmise}}$), (vt. (1) ja lisa 2).

Saadud hinnangute $\widehat{nih_{e_{kordusmõõtmise}}} = nih_{e_{kordusmõõtmise}} + \varepsilon_{kordusmõõtmise}$ täpsused $D(\varepsilon_{kordusmõõtmise})$ on leitavad hinnangute standardviga kasutades. Mõlema mudeli abil hinnatud mõõtjate süstemaatilised vead kanti joonisele (11). Joonisel x -teljel on esimese mudeli koefitsendid ja y -teljel on kordusmõõtmiste põhjal hinnatud mudeli koefitsendid. Nende andmete põhjal hinnati veel regressioonsirge ja lisati joonisele, mille kujuks tuli:

$$nih_{e_{kordusmõõtmise}} = 1.2999 \cdot nih_{e_{mõõtmise}} - 0.1504.$$

Mudeli determinatsioonikordaja on 0.3217 ehk $\widehat{nih_{e_{mõõtmise}}}$ kirjeldab ära 32 % kordusmõõtmiste mudeli põhjal saadud hinnangute hajuvusest.



Joonis 11: Mudelite koefitsendid koos regressioonsirgega

Kuna kordusmõõtmiste mudeli puhul hinnangute dispersioonide keskmine üle erinevate hindajate moodustab 61.7% nihke hinnangute dispersioonist, siis võime järeldada, et kehv korrelatsioon kahel viisil leitud nihke hinnangu vahel pole vaid tingitud kordusmõõtmiste abil saadud nihkehinnangute ebatäpsusest. See viitab sellele, et kordusmõõtmised annavad siiski lisainformatsiooni mõõtjate täpsuse ja võimaliku nihke tuvastamisel.

3.6 Dispersioonkomponentide mudel

Analüüsi käigus taheti ka hinnata kordustäpsust mõõtmistel ning selgitada välja reaalselt kui suure osa veast moodustab mõõtjast sõltuv nihe, mida on võimalik korrigeerida ja kui suur osa on nõ. vältimatu.

Kuna lindude tiivapikkuse mõõtmised võivad sõltuda nii linnu iseärasustest, mõõtja täpsusest kui ka juhuslikest teguritest (nt lindude loomulik tiivapikkuse hajuvus), aitab mudel hinnata, kui suur osa koguveast tuleneb mõõtja eripärast.

Selleks liideti kokku kõik suitsupääsukeste mõõtmised (nii esmakordsed kui kordus-

mõõtmised) üheks tabeliks ja tekitati segamudel, et hinnata kui suure osa veast moodustab mõõtja. Tekkinud mudel oli kujuga:

$$y_{ij} = f(\text{Mass}) + \underbrace{\gamma_i + \varepsilon_{ij}}_{\text{juhuslik viga}}, \quad (3)$$

kus y_{ij} on i -nda mõõtja j -is mõõdetud tiivapikkus, f on 8-nda astme massist sõltuv polünoom, γ_i on i -nda mõõtja poolt tekitatud nihe mõõtmises ning ε_{ij} on vastava mõõtmise juhuslik viga.

Mudeli tulemusena saime, et ligi 11% veast on tingitud sellest, et mõõtjad kipuvad nihkega mõõtma (kas siis liiga pikaks või liiga lühikeseks). See tähendab, et mõõtjate vahel leidub süsteemseid erinevusi, kuid suurem osa varieeruvusest tuleneb siiski muudest (juhuslikest) teguritest.

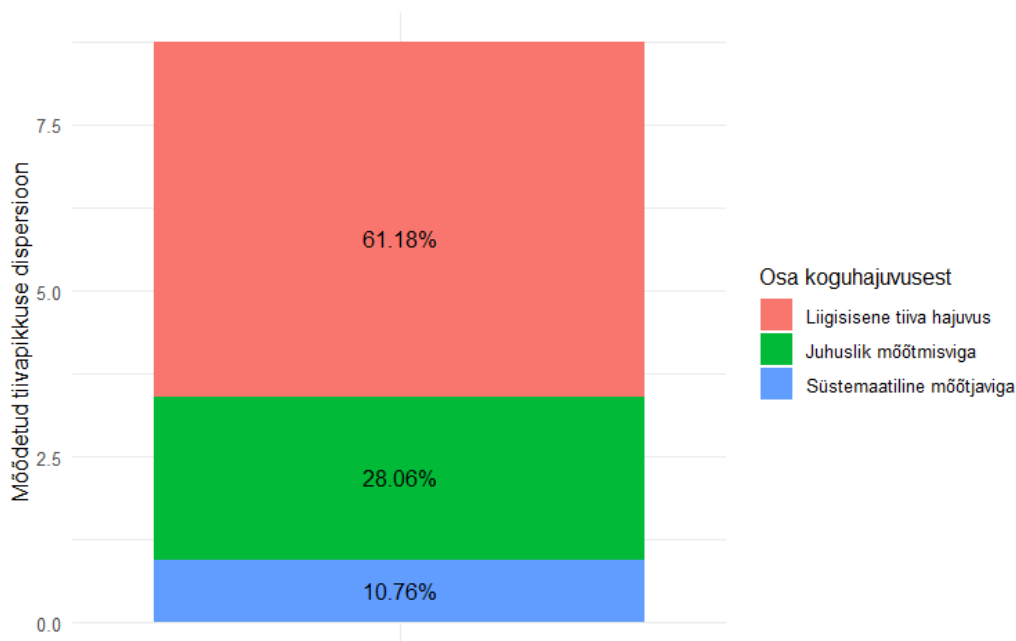
3.6.1 Liigisisene mõju hajuvusele

Järgenvalt otsustati lisada linnu unikaalne kood mudelisse, kuna see võimaldaks hinnata linnu enda mõju mõõtmistulemuste hajuvusele. Tekkinud mudel oli analoogne eelmise mudeliga (3), ainult et viga on jaotatud veel rohkemateks osadeks:

$$y_{ij} = f(\text{Mass}) + \underbrace{\gamma_i + \tau_j + \varepsilon_{ij}}_{\text{juhuslik viga}},$$

kus lisandunud τ_j tähistab linnu poolt tingitud hajuvust mõõtmistulemustes.

Tulemused kanti ka joonisele:

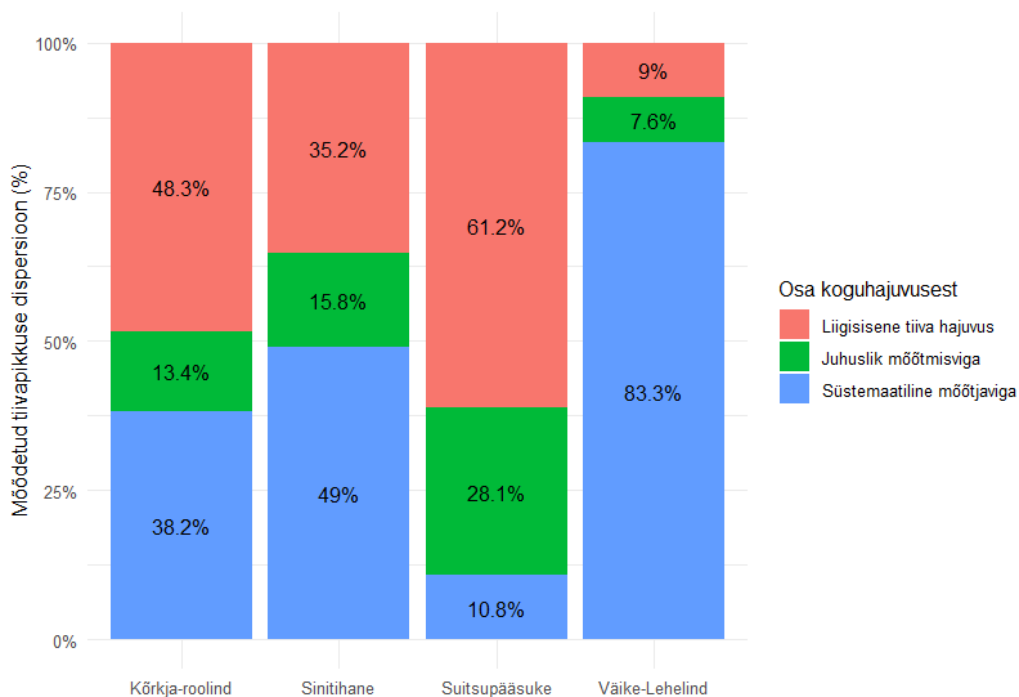


Joonis 12: Suitsupääsukuseste mõõtetulemuste hajuvuse jaotus

Jooniselt (12) on näha, et lindude unikaalsete koodide lisamine võimaldas mõõtetulemuste hajuvust palju täpsemini kirjeldada. Tulemustest loeb välja, et suurem osa (üle 60%) kõikumisest moodustab linnu enda liigisisene tiiva hajuvus (sama mõõtja poolt, sama massiga linnud võivadki olla erineva tiivapikkusega), süsteemilise mõõtevea osa väärtuseks saadi ligi 11% ning juhusliku mõõtevea osa väärtuseks 28%. See näitab, et suur osa sama massiga suitsupääsukeste tiiva pikkuste mõõtmiste hajuvusest moodustab lihtsalt looduslik kõikumine tiiva pikkustes.

Huvi pakkus ka hüpotees, et hajuvuse jaotus erineb liigiti. Kontrolliks hinnati veel kolme enim mõõdetud linnuliigi jaoks eraldi mudel ning tehti sama protsess läbi, mudelite tulemused kanti joonisele (13):

Eri liikide võrdlus näitab, et üllatavalt tiivapikkuse varieeruvuse peamine allikas ei ole erinevate liikide puhul sama. Näiteks suitsupääsukese puhul on suurim osa hajuvusest (u 61%) põhjustanud lindude looduslik varieeruvus, samas kui mõõt-



Joonis 13: Erinevate liikide hajuvuste jaotused

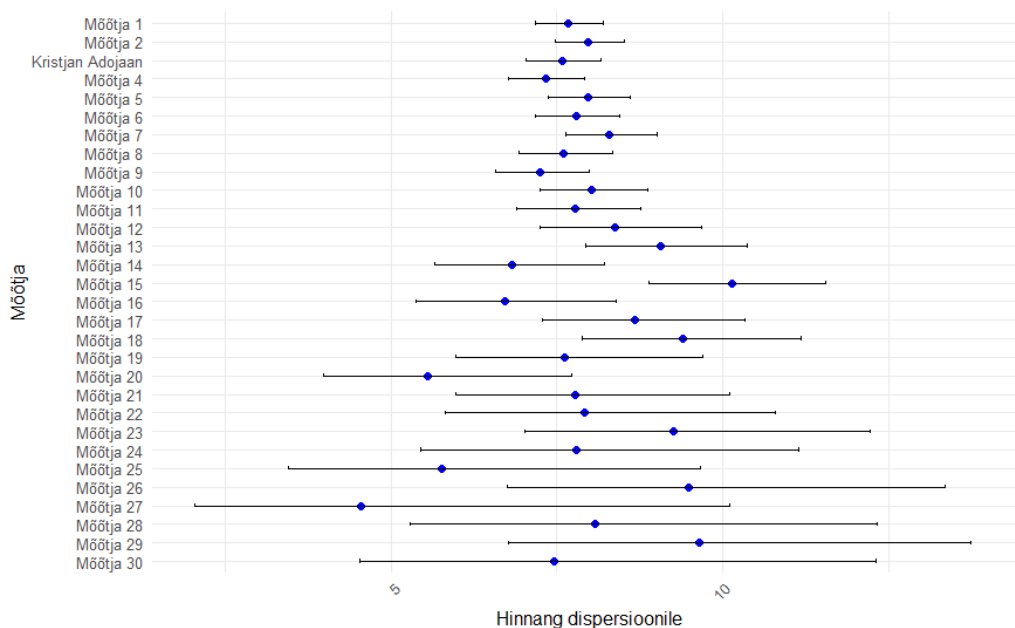
ja poolt tekitatud, nii süstemaatiline kui juhuslik viga – moodustab väiksema osa varieeruvusest. Vastupidine muster ilmneb väike-lehelinnu puhul, kus süstemaatiline mõõtjaviga ületab oluliselt liigisese hajuvuse, mis viitab võimalikule raskusele liigi täpse mõõtmisega.

Kõrkja-roolinnu ja sinitihase puhul jaguneb viga mõõdukalt kõikide allikate vahel, kuid ka siin ulatub mõõtjapoolne panus kuni 50–65% koguhajuvusest, mis kinnitab mõõtjatega seotud varieeruvuse olulisust. Need tulemused rõhutavad vajadust mõõtjate koolituse ja standardiseeritud mõõtmismetoodika järele, eriti väiksemate liikide puhul.

3.7 Kordustäpsuse kontroll mõõtjatel

Lisaks üldise mõõtevea jaotumise hindamisele sooviti analüüsida, kas mõõtjate vahel leidub olulisi erinevusi mõõtmistäpsuse osas. Selleks võeti aluseks eelnevalt koostatud dispersioonikomponentide mudel (3), kus hinnati suitsupääsukeste tiiva pikkust sõltuvalt massist ja arvestati mõõtjaspetsiifilist juhuslikku mõju. Sellest mudelist võeti juhuslikud vead, mis peegeldavad mõõtmisest järele jäänud seletamata hajuvust, ning need tõsteti ruutu, et saada hinnang iga vaatluse dispersioonile. Seejärel tekitati mudel, selgitamaks ruuthälvete sõltuvust mõõtjast, otsustati kasutada logaritmilist seosefunktsiooni kasutatavat üldistatud lineaarset mudelit, et vältida olukorda, et hinnang dispersioonile tuleb negatiivne.

Mudelist saadud hinnangud sisestajate dispersioonidele teisendati tagasi algskaalale ning esitati graafiliselt koos usalduspiiridega:



Joonis 14: Hinnangud mõõtjate hajuvusestele koos usalduspiiridega

Joonisel (14) on mõõtjad järjestatud mõõdetud suitsupääsukeste koguse (kogemuse) järgi, ülal on enamkogenud ja all vähemkogenud mõõtjad. Tulemustest on näha,

et rōngastajad, kes on rohkem mōõtnud linde on tūūpiliselt järjepidevamad, ning kogemuse vāhenedes kordustāpsus vāheneb.

Lōpuks viidi lābi Tukey *post-hoc* test, et kontrollida, kas vāhemalt kahe mōõtja vahel esineb statistiliselt oluline erinevus mōõtmise tāpsuses. Test kinnitas, et vāhemalt ūks paar erineb mōõtmistāpsuse poolest oluliselt, st. ūks mōõtis palju „lohakamalt“ (ehk hajuvus oli oluliselt suurem) kui teine. Kāesolevate andmete puhul leidsime 3 sellist paari:

- Mōõtja 15 vs Mōõtja 4,
- Mōõtja 15 vs Mōõtja 9,
- Mōõtja 15 vs Mōõtja 20.

Seost on ka nāha joonisel, et nende paaride usaldusintervallid ei kattu. Tulemusest on nāha, et mōõtja 15 on oluliselt ebakorreksem kui teised 3, kes temaga paaris olid.

Kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli uurida, kas Vaibla linnujaama andmete põhjal leidub selliseid mõõtjaid, kelle mõõtmistes esineb nihe. Samuti oli eesmärgiks andmetest leida teisi tegureid, mis võiksid mõõtmistulemusi oluliselt mõjutada.

Analüüsi käigus leiti oluline mittelineaarne seos suitsupääsukeste tiivapikkuse ja massi vahel. Kordusmõõtmiseid uurides leiti ka 11. erineval Vaibla linnujaamas tegutsenud mõõtja puhul mõõtmistulemustes statistiliselt oluline nihe võrreldes Kristjan Adojaani tulemustega. Leiti ka kinnitus hüpoteesile, et väiksema kogemusega mõõtjad ei julge linnu tiiba venitada, mistõttu on nende mõõtmistulemused väiksemad (mõõdavad tiivapikkust tegelikkusest lühemaks). See seos kinnitas, et mõõtja kogemusel on oluline mõju suitsupääsukeste tiivapikkuse mõõtmistes.

Lisaks nendele seostele kontrolliti, millest on tingitud mõõtmistulemuste hajuvus kasutades dispersioonkomponentide mudelit. Tekitati 2 erinevat mudelit, millest esimene hindas ainult mõõtja poolt tekitatud süsteemset viga ja teine hindas lisaks sellele veel linnu poolt tekitatud hajuvust tiiva pikkuste mõõtmistes. Selle analüüsi järgselt võrreldi 4 erineva linnuliigi hajuvusallikaid, mille tulemusena saadi teada, et hajuvusallikate osakaalud erinevad liigiti, nt. eriti väikestel lindudel on suurem osa tiivapikkuse mõõtmiste veast juhuslik mõõtemääramatus, mis võib viidata sellele, et neid ongi raskem mõõta sõltumata mõõtjast. Viimaseks kontrolliti, kas leidub selline paar mõõtjaid, kelle puhul saab andmete põhjal väita, et üks mõõdab ebakorreksemalt kui teine. Tõepoolest antud andmete korral leiti kolm sellist paari.

Käesolevas töös keskenduti peamiselt suitsupääsukestele, kuna neid on kõige rohkem mõõdetud ning analüüsi oli usaldusväärsem teha. Edaspidi oleks oluline uurida, kas sarnased seosed, nagu leiti suitsupääsukeste tiivapikkuste mõõtmistulemuste hindamisel, kehtivad ka teiste linnuliikide puhul ning kas tulemused kattuvad suitsupääsukeste andmete analüüsi tulemustega. See annaks laiemat pilti mõõtmisvigade allikatest erinevate liikide puhul ja aitaks parandada mõõtmismetoodikaid.

Kasutatud allikad (BIB_{TEX}iga)

- Bairlein, F. (2001). “The contribution of ringing to the conservation and management of bird populations: A review”. *Ardea* 89.1, lk. 167–184. URL: https://www.researchgate.net/publication/286979263_The_contribution_of_ringing_to_the_conservation_and_management_of_bird_populations_A_review (vaadatud 05.05.2025).
- Busse, P. ja W. Meissner (2016). *Bird Ringing Station Manual*, lk. 186. URL: <https://kuling.org.pl/wp-content/uploads/2016/10/Bird-Ringing-Station-Manual-Busse-and-Meissner.pdf> (vaadatud 22.04.2025).
- Harnos, A., P. Fehérvári ja T. Csörgő (2015). “Hitchhikers’ guide to analysing bird ringing data”. *Ornis Hungarica* 23.2, lk. 163–188. DOI: [10.1515/orhu-2015-0018](https://doi.org/10.1515/orhu-2015-0018). URL: <https://doi.org/10.1515/orhu-2015-0018>.
- Käärik, E. (2013). *Andmeanalüüs II konspekt*. URL: <https://dspace.ut.ee/server/api/core/bitstreams/76953a28-1622-440b-b286-889dcbb7d68e/content> (vaadatud 04.03.2025).
- Yellowlees, I. (2021). *Accuracy, Precision and Bias*. URL: <https://www.quantics.co.uk/blog/accuracy-precision-and-bias-2/> (vaadatud 13.03.2025).

Lisa 1. Kordusmõõtmiste eripärade mudeli väljund

Call:

```
lm(formula = vahed ~ maatriks[, -4] - 1, data = andmed)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-71.889	-1.000	-0.147	0.739	54.880

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
maatriks[, -4]Mõõtja 8	1.91035	0.29868	6.396	1.99e-10	***
maatriks[, -4]Mõõtja 5	1.46555	0.27737	5.284	1.41e-07	***
maatriks[, -4]Mõõtja 4	1.15965	0.25320	4.580	4.94e-06	***
maatriks[, -4]Mõõtja 6	1.19032	0.25045	4.753	2.15e-06	***
maatriks[, -4]Mõõtja 18	0.64992	0.39126	1.661	0.09686	.
maatriks[, -4]Mõõtja 30	0.03318	0.76392	0.043	0.96536	
maatriks[, -4]Mõõtja 3	0.66316	0.24341	2.724	0.00650	**
maatriks[, -4]Mõõtja 15	-0.49214	0.70638	-0.697	0.48607	
maatriks[, -4]Mõõtja 2	0.85273	0.28309	3.012	0.00263	**
maatriks[, -4]Mõõtja 21	-4.11087	0.68379	-6.012	2.19e-09	***
maatriks[, -4]Mõõtja 39	-0.09819	1.01589	-0.097	0.92301	
maatriks[, -4]Mõõtja 42	0.76366	2.25291	0.339	0.73467	
maatriks[, -4]Mõõtja 13	-0.82960	0.42422	-1.956	0.05066	.
maatriks[, -4]Mõõtja 50	-1.84035	3.89154	-0.473	0.63633	
maatriks[, -4]Mõõtja 10	1.88641	0.33058	5.706	1.33e-08	***
maatriks[, -4]Mõõtja 52	3.46555	3.89318	0.890	0.37349	

maatriks[, -4]Mõõtja 44	1.06165	2.79772	0.379	0.70438	
maatriks[, -4]Mõõtja 28	-0.76311	1.00031	-0.763	0.44563	
maatriks[, -4]Mõõtja 7	0.66064	0.45526	1.451	0.14690	
maatriks[, -4]Mõõtja 11	0.20941	0.48999	0.427	0.66915	
maatriks[, -4]Mõõtja 33	-0.10493	1.74692	-0.060	0.95211	
maatriks[, -4]Mõõtja 22	-1.41625	1.79153	-0.791	0.42932	
maatriks[, -4]Mõõtja 35	-11.33376	1.62405	-6.979	4.07e-12	***
maatriks[, -4]Mõõtja 9	-0.72335	0.38539	-1.877	0.06068	.
maatriks[, -4]Mõõtja 37	1.52614	1.75256	0.871	0.38397	
maatriks[, -4]Mõõtja 16	-0.92397	1.04767	-0.882	0.37792	
maatriks[, -4]Mõõtja 31	-0.28133	1.26213	-0.223	0.82364	
maatriks[, -4]Mõõtja 25	-1.31866	1.19911	-1.100	0.27160	
maatriks[, -4]Mõõtja 23	-1.83726	1.33051	-1.381	0.16748	
maatriks[, -4]Mõõtja 14	0.20457	0.58427	0.350	0.72628	
maatriks[, -4]Mõõtja 29	1.35895	1.13394	1.198	0.23090	
maatriks[, -4]Mõõtja 38	-1.49713	2.25108	-0.665	0.50608	
maatriks[, -4]Mõõtja 34	1.11464	1.97568	0.564	0.57270	
maatriks[, -4]Mõõtja 26	0.45996	1.14500	0.402	0.68794	
maatriks[, -4]Mõõtja 24	0.74659	1.38142	0.540	0.58894	
maatriks[, -4]Mõõtja 27	-0.71051	1.95535	-0.363	0.71637	
maatriks[, -4]Mõõtja 41	-0.55088	1.95263	-0.282	0.77788	
maatriks[, -4]Mõõtja 55	4.20852	2.25707	1.865	0.06239	.
maatriks[, -4]Mõõtja 19	-1.84504	0.81553	-2.262	0.02378	*
maatriks[, -4]Mõõtja 20	-0.04739	1.01244	-0.047	0.96267	
maatriks[, -4]Mõõtja 17	-7.15948	0.92609	-7.731	1.70e-14	***
maatriks[, -4]Mõõtja 32	-0.80259	1.75044	-0.459	0.64664	
maatriks[, -4]Mõõtja 12	0.31855	0.47381	0.672	0.50146	
maatriks[, -4]Mõõtja 47	1.64992	3.90295	0.423	0.67253	
maatriks[, -4]Mõõtja 58	-2.00000	3.88329	-0.515	0.60659	

```
maatriks[, -4]Mõõtja 40  2.27479  2.75567  0.825  0.40919
maatriks[, -4]Mõõtja 45  0.35243  2.25355  0.156  0.87574
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 3.883 on 1939 degrees of freedom
(40 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.1452, Adjusted R-squared:  0.1244
F-statistic: 7.006 on 47 and 1939 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Lisa 2. Kordusmõõtmiste eripärade suitsupääsukeste mudeli väljund

Call:

```
lm(formula = vahed ~ maatriks[, -6] - 1, data = andmed)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-4.3619	-0.6086	0.0000	0.5380	8.5725

Coefficients: (1 not defined because of singularities)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
maatriks[, -6]Mõõtja 28	-0.94125	0.83279	-1.130	0.261000
maatriks[, -6]Mõõtja 15	-0.86973	0.77120	-1.128	0.262043
maatriks[, -6]Mõõtja 9	0.36493	0.83811	0.435	0.664170
maatriks[, -6]Mõõtja 5	3.30812	0.59797	5.532	0.000000241 ***
maatriks[, -6]Mõõtja 2	2.49589	0.53064	4.704	0.000007967 ***
maatriks[, -6]Mõõtja 13	0.28470	0.62281	0.457	0.648545
maatriks[, -6]Mõõtja 37	-2.63507	1.87601	-1.405	0.163144
maatriks[, -6]Mõõtja 7	1.89839	0.59814	3.174	0.001984 **
maatriks[, -6]Mõõtja 6	0.45147	0.57839	0.781	0.436845
maatriks[, -6]Mõõtja 1	0.72389	0.54695	1.324	0.188599
maatriks[, -6]Mõõtja 4	0.85725	0.59750	1.435	0.154391
maatriks[, -6]Mõõtja 11	-0.02712	0.72119	-0.038	0.970073
maatriks[, -6]Mõõtja 29	2.10574	0.98766	2.132	0.035381 *
maatriks[, -6]Mõõtja 19	2.17155	1.10596	1.964	0.052284 .
maatriks[, -6]Mõõtja 14	-4.63805	1.21790	-3.808	0.000238 ***
maatriks[, -6]Mõõtja 12	3.30812	1.78172	1.857	0.066212 .

maatriks[, -6]Mõõtja 8	-1.11942	0.68081	-1.644	0.103171
maatriks[, -6]Mõõtja 30	1.00763	2.48183	0.406	0.685583
maatriks[, -6]Mõõtja 27	-0.50411	1.76027	-0.286	0.775163
maatriks[, -6]Mõõtja 24	2.00763	1.82826	1.098	0.274716
maatriks[, -6]Mõõtja 10	1.00763	0.72494	1.390	0.167542
maatriks[, -6]Mõõtja 22	-2.27611	1.76526	-1.289	0.200150
maatriks[, -6]Mõõtja 17	-2.63507	1.87601	-1.405	0.163144
maatriks[, -6]Mõõtja 20	0.00000	1.67839	0.000	1.000000
maatriks[, -6]Mõõtja 32	-1.63507	1.87601	-0.872	0.385471
maatriks[, -6]Mõõtja 21	-0.27611	1.76526	-0.156	0.876015
maatriks[, -6]Mõõtja 40	0.89839	1.78178	0.504	0.615191
maatriks[, -6]Mõõtja 18	NA	NA	NA	NA
maatriks[, -6]Mõõtja 38	-1.27611	1.76526	-0.723	0.471379

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.678 on 103 degrees of freedom

(15 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.5884, Adjusted R-squared: 0.4766

F-statistic: 5.26 on 28 and 103 DF, p-value: 0.000000002497

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Uku Siim Timmusk,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Vaibla Linnujaama lindude mõõtmisandmete analüüs“, mille juhendajad on Märt Möls ja Kristjan Adojaan, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Uku Siim Timmusk

10.05.2025