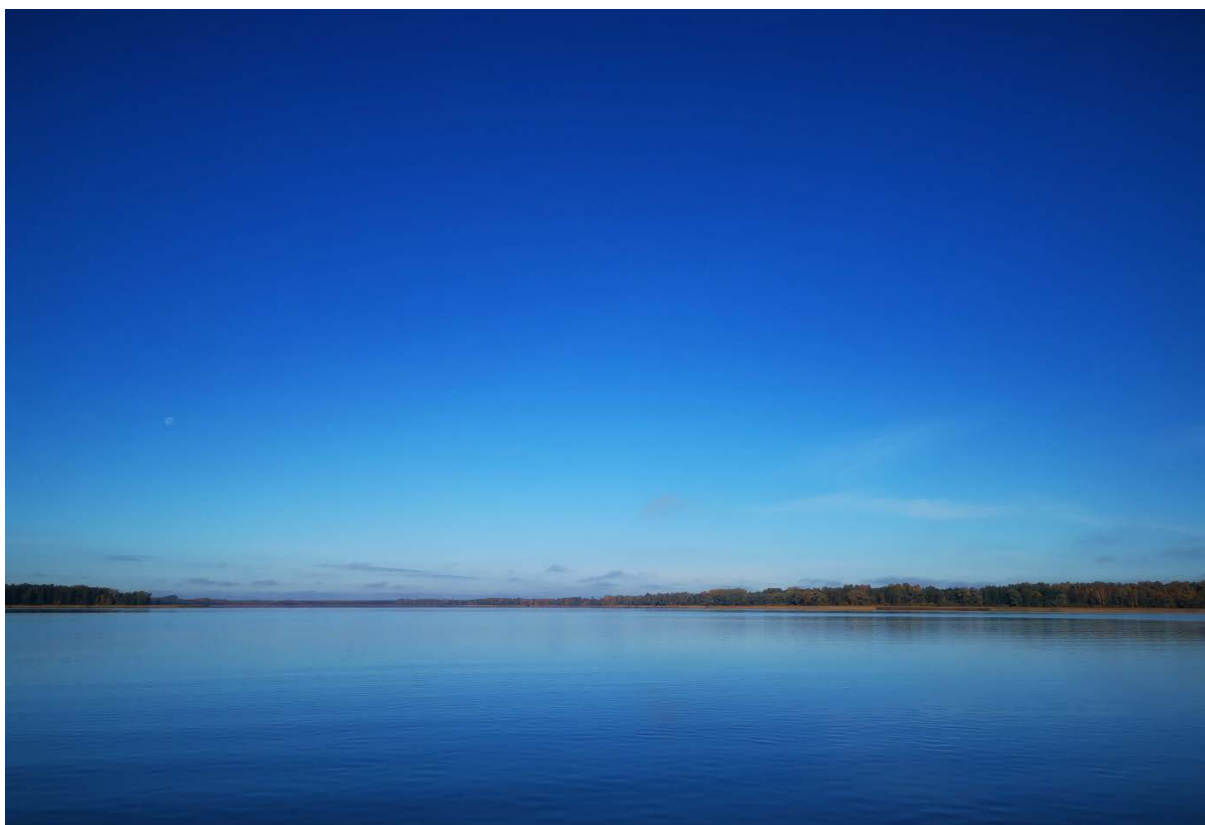


SAUKAS EZERA EKOSISTĒMAS BARĪBAS TĪKLA MODELIS



**LIFE GoodWater IP A4.2. aktivitāte "Ezera ekosistēmas modeļa
izstrāde/pielāgošana"**

Rīga, 2023



Saukas ezera ekosistēmas barības tīkla modelis

Autori: Ivars Putnis¹, Jānis Gruduls¹

¹ Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskais institūts "BIOR".

© Vāka foto: Jānis Gruduls

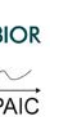
Citēšanas paraugs: Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskais institūts "BIOR". Saukas ezera ekosistēmas barības tīkla modelis, LIFE GoodWater IP, Rīga, 34 lpp.

Materiāls tapis integrētā projektā "Latvijas upju baseinu apsaimniekošanas plānu ieviešana laba virszemes ūdens stāvokļa sasniegšanai" (LIFE GOODWATER IP, LIFE18 IPE/LV/000014), kas ir saņēmis finansējumu no Eiropas Savienības LIFE Programmas un Valsts reģionālās attīstības aģentūras.

Informācija atspoguļo tikai LIFE GOODWATER IP īstenotāju redzējumu, un Eiropas Klimata, infrastruktūras un vides izpildaģentūra neatbild par to, kā tiek izmantota šeit paustā informācija.

© Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskais institūts "BIOR", 2023.

Dokumenta izstrādes lapa	
Dokumenta versijas numurs	v 1.0
Dokumenta plānotais izstrādes datums	06.2023
Dokumenta faktiskais izstrādes datums	12.2023
Dokumenta aktuālās versijas izstrādes datums	12.2023
Projekta aktivitātes/apakšaktivitātes numurs	A4



Kopsavilkums

Projekts "Latvijas upju baseinu apsaimniekošanas plānu ieviešana laba virszemes ūdens stāvokļa sasniegšanai" nr. LIFE18 IPE /LV/000014 (LIFE GOODWATER IP) tiek īstenots ar Eiropas Savienības vides un klimata programmas LIFE un Valsts reģionālās attīstības aģentūras finansiālu atbalstu. Projekta kopējais mērķis ir ilgtermiņā uzlabot ūdens kvalitāti aptuveni 30 % riska ūdensobjektos, izstrādājot, adaptējot un ieviešot dažādus Latvijas apstākļiem piemērotus inovatīvus apsaimniekošanas un pārvaldības pasākumus.

A4 aktivitātes galvenais mērķis ir izstrādāt zinātniski pamatotas rekomendācijas riska ezera ekosistēmas atveseļošanai un ekoloģiskā stāvokļa uzlabošanai. Šajā atskaitē apkopoti otrā darba uzdevuma rezultāti: "izstrādāt ezera ekosistēmas modeli, kas ir balstīts uz barības tīkla pētījumu rezultātiem un norāda uz ekosistēmas ekoloģisko stāvokli".

Atskaitē aprakstīta Saukas ezera ekosistēmas barības tīkla modeļa izveide un modeļa rezultāti izmantojot *Ecopath with Ecosim* modelēšanas pieeju. Modelis sastāvēja no 23 funkcionālajām grupām, kas raksturoja dažādus barības tīkla komponentus – detrītu, makrofitus, fitoplanktonu, zooplanktonu, zoobentosu un zivis. Ar modeļa palīdzību raksturota ezera ekosistēmas struktūra, funkcionālo grupu produkcija, ekotrofiskā efektivitāte un savstarpējā ietekme starp dažādiem barības tīkla komponentiem.



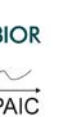
The project “Implementation of Latvian River Basin Management Plans to Achieve Good Surface Water Status” no. LIFE18 IPE / LV / 000014 (LIFE GOODWATER IP) is implemented with the financial support of the European Union Environment and Climate Program LIFE and the State Regional Development Agency. The overall aim of the project is to improve the water quality of approximately 30% of water bodies at risk in the long term by the developing, adapting to Latvian conditions and implementing various innovative management and governance measures.

The report describes the development and outputs of the food web model of the Lake Sauka ecosystem using the Ecopath with Ecosim modelling approach. The model consisted of 23 functional groups that characterized various food web components - detritus, macrophytes, phytoplankton, zooplankton, zoobenthos and fish. The model describes the structure of the lake ecosystem, the production of functional groups, ecotrophic efficiency and interactions between the different food web components.



Satura rādītājs

Kopsavilkums	3
Summary	4
Saīsinājumi	6
Ievads	7
1. Metodika	8
1.1. Saukas ezera raksturlielumi	8
1.2. Barības tīkla modelēšana – EwE metode	9
1.3. EwE modeļa parametri	10
1.3.1. Biomasa	10
1.3.2. Produkcija	12
1.3.3. Patēriņš	13
1.3.4. Barības sastāvs	14
1.3.5. EwE modeļa parametrizācija	14
1.3.6. Rezultātu vizualizācija	15
2. Rezultāti	16
2.1. Ekosistēmas struktūra	16
2.2. Biomasa un produkcija	17
2.3. Ekotrofiskā efektivitāte	21
2.4. Patēriņš un produkcija	22
2.5. Savstarpējā ietekme	23
2.6. Ekosistēmas indikatori	24
Secinājumi	26
Izmantotā literatūra	27
PIELIKUMI	29
1. Pielikums. Modeļa ievades parametri	29
2. Pielikums. Modeļa diagnostika	31



Saīsinājumi

BIOR - Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskais institūts "BIOR";

EwE – Ecopath with Ecosim;

P – produkcija;

B – biomasas;

Q – barības patēriņš;

EE – ekotrofiskās efektivitātes koeficients;

P/B – attiecība starp produkciju un biomasu;

Q/B – attiecība starp patēriņu un biomasu;

P/Q – attiecība starp produkciju un patēriņu;

TPP/TR – attiecības starp kopējo pirmprodukciju un respirāciju.



Ievads

Projekts "Latvijas upju baseinu apsaimniekošanas plānu ieviešana laba virszemes ūdens stāvokļa sasniegšanai" projekta numurs LIFE18 IPE /LV/000014 (LIFE GOODWATER IP) tiek īstenots ar Eiropas Savienības vides un klimata programmas LIFE un Valsts reģionālās attīstības aģentūras finansiālu atbalstu. Projekta kopējais mērķis ir ilgtermiņā uzlabot ūdens kvalitāti aptuveni 30 % riska ūdensobjektos, izstrādājot, adaptējot un ieviešot dažādus Latvijas apstākļiem piemērotus inovatīvus apsaimniekošanas un pārvaldības pasākumus.

A4 aktivitātes galvenais mērķis ir izstrādāt zinātniski pamatotas rekomendācijas riska ezera ekosistēmas atveseļošanai un ekoloģiskā stāvokļa uzlabošanai. Šajā atskaitē apkopoti otrā darba uzdevuma rezultāti "izstrādāt ezera ekosistēmas modeli, kas ir balstīts uz barības tīkla pētījumu rezultātiem un norāda uz ekosistēmas ekoloģisko stāvokli".

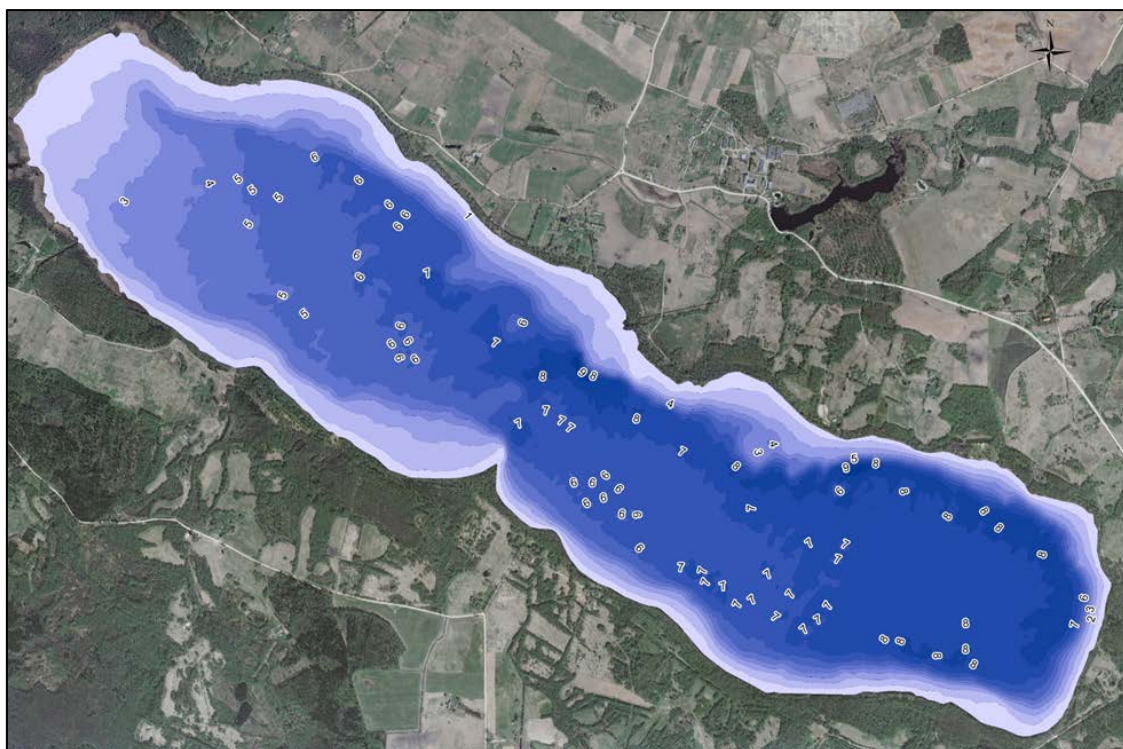
Ezeru aktīvā rekreatīvā un saimnieciskā izmantošana kā arī pieaugošās ekoloģiskās problēmas rada nepieciešamību pēc zinātniski pamatotu apsaimniekošanas plānu izstrādes ar mērķi uzlabot ezera ekoloģisko stāvokli un nodrošināt ezera resursu ilgtspējīgu izmantošanu. Šādu plānu izstrādei ir nepieciešama kompleksa izpratne par ekosistēmas uzbūvi un funkcionēšanu. Lai korekti atspoguļotu ekosistēmas funkcionēšanu, vielu apriti, saistības starp trofiskajiem līmeņiem, veidotu nākotnes scenāriju prognozes, balstoties uz dažādām apsaimniekošanas aktivitātēm u.tml., nepieciešams veidot ekosistēmas modeļus, kas ietver pēc iespējas plašāku informāciju par visiem trofiskajiem līmeņiem un galvenajām vielu plūsmām ekosistēmā.



1. Metodika

1.1. Saukas ezera raksturlielumi

Modelēšanas mērķiem sākotnēji nepieciešams definēt ekosistēmas dimensijas. Tika pieņemts, ka ezera kopējā platība ir 700 ha (7000511,2 m²). Pēc BIOR veiktās dziļumu kartēšanas noteikts ezera maksimālais dziļums (9,7 m), vidējais dziļums (4,8 m) un dziļuma zonu platības un to proporcijas (1.1.1. attēls un 1.1.1. tabula).



1.1.1. attēls. Saukas ezera dziļumu karte.

1.1.1. tabula. Saukas ezera dziļuma zonas, to platības un proporcijas.

Dziļuma zona, m	Platība, m ²	Platības proporcija, %	Tilpums, m ³
0-1	711989,8	10,2	6673720
1-2	791569,5	11,3	5927063
2-3	553204,3	7,9	5221783
3-4	506463,5	7,2	4716248
4-5	599206,6	8,6	4173484
5-6	927638,4	13,3	3442172
6-7	1270470,2	18,1	2305536
7-8	1320433,6	18,9	972435
8-9	309972,3	4,4	97773
9-10	9563,0	0,1	2274
Kopā	7000511,2	100	33532488



1.2. Barības tīkla modelēšana – EwE metode

Saukas ezera barības tīkla modelēšana tika veikta izmantojot *Ecopath with Ecosim* (EwE) modelēšanas metodi (Christensen et al. 2008). Šī metode ir balstīta uz masas balansu ekosistēmā, saglabājot tās stabilo stāvokli un modelējot enerģijas plūsmas starp trofiskajiem līmeņiem, sistēmai esot noslēgtai (Christensen & Walters 2004; Heymans et al. 2012). Šo modelēšanas metodi var izmantot, lai identificētu un kvantitatīvi noteiktu galvenās enerģijas plūsmas ekosistēmām, aprakstītu ekosistēmas resursus un to mijiedarbību starp dažādiem organismiem, novērtētu zvejas vai vides izmaiņu ietekmi uz ekosistēmu, izpētītu pārvaldības politikas iespējas, iekļaujot ekonomiskos, sociālos un ekoloģiskos apsvērumus zvejniecībā (Heymans et al. 2016). Metode sastāv no trīs galvenajām komponentēm: *Ecopath* – ekosistēmas statisks modelis, *Ecosim* – modeļa dinamiska simulācija laikā un *Ecospace* – modeļa dinamiska simulācija laika un telpā (Christensen et al. 2008).

Saukas ezera ekosistēmas barības tīkla modelēšanai tika veidots statisks *Ecopath* modelis, izmantojot *Ecopath with Ecosim* programmu (versija 6.6.6). *Ecopath* modelis var tikt veidots noteiktai ekosistēmai vai ekosistēmas daļai. Šajā gadījumā modelis tika veidots visam Saukas ezeram. Pēc modeļa principa viss ezers tiek raksturots kā noteikta izmēra sistēma (kastes princips) ar noteiktu dzīvo organismu daudzumu, kas mijiedarbojas savā starpā. Modelī dzīvie organismi tiek apvienoti funkcionālajās grupās. Šādās grupās var apvienot gan vairākas sugas, gan veidot atsevišķas grupas vienas sugas ietvaros. Galvenais nosacījums, apvienojot organismus funkcionālajās grupās, ir to ekoloģiskā līdzība. Vienu funkcionālo grupu veido organismi ar līdzīgu barošanos, augšanu un mirstību. Ekosistēmas barības tīkls tiek raksturots pēc funkcionālo grupu mijiedarbības kādā laika periodā.

Ecopath modeļa pamatvienādojums reprezentē masas balansu katrai funkcionālajai grupai sistēmā, kas sastāv no n funkcionālajām grupām. Funkcionālās grupas i produkcija, ko veido nozveja, plēsonības radītā mirstība, biomasas akumulācija, neto migrācija un cita mirstība, tiek izteikta pēc formulas:

$$P_i = Y_i + B_i \cdot M2_i + E_i + BA_i + P_i \cdot (1 - EE_i) \quad (1)$$

kur P_i - kopējā produkcija grupai i , Y_i - nozvejas lielums grupai i , B_i - grupas i biomasa, $M2_i$ - grupas i izēšanas apjoms, E_i - neto migrācija (emigrācija-imigrācija) grupai i , BA_i - biomasas akumulācija grupai i un $P_i \cdot (1 - EE_i) = MO_i$, kas reprezentē pārējo mirstību grupai i . EE_i ir ekotrofiskais koeficients, kas norāda grupas i produkcijas daļu, kas pāriet uz nākošo trofisko līmeni.

Vienādojums (1) var tikt izteikts kā:

$$B_i \cdot \left(\frac{P}{B}\right)_i - \sum_{j=1}^n B_j \cdot \left(\frac{Q}{B}\right)_j \cdot DC_{ji} - \left(\frac{P}{B}\right)_i \cdot B_i \cdot (1 - EE_i) - Y_i - E_i - BA_i = 0 \quad (2)$$

kur P/B - attiecība starp produkciju un biomasu, Q/B - attiecība starp patēriņu un biomasu, DC_{ji} - barības objekta i daļa plēsēja j barības sastāvā. No vienādojuma (2) *Ecopath* veido vairāku lineāru vienādojumu sēriju katrai funkcionālajai grupai nosakot 1 nezināmo parametru, kas var būt B (biomasa), P/B (produkcija/biomasa, Q/B (patēriņš/biomasa) vai EE (ekotrofiskā efektivitāte). Parasti aprēķināta tiek EE , jo ekosistēmā tas ir praktiski neizmērāms lielums. Modeļa balansēšanai papildus ir izmantojama informācija par funkcionālo grupu nozvejām, migrācijām, biomasas akumulācijas apmēru, asimilācijas lielumu un barības sastāvu.

Ecopath modelī funkcionālajām grupām enerģijas ienākošajām un izejošajām plūsmām ir jābūt balansētām, veidojot sakarību:

$$C_i = P_i + R_i + U_i \quad (3)$$

kur C_i – patēriņš; P_i – produkcija; R_i – respirācija; U_i – neasimilēta raciona daļa.

Respirācija tiek noteikta kā starpība starp patēriņu un produkciju (plus neasimilētā raciona daļa). Balstoties uz iepriekšminētajām sakarībām pēc vienādojumiem (2) un (3), modelis tiek balansēts un kalpo par pamatu vielu plūsmu raksturošanai un scenāriju veidošanai.

1.3. EwE modeļa parametri

Modeļa ievadparametru aprēķināšanai definēta Saukas ezera platība – 7,00 km², ūdens tilpums – 33532488 m³, laika solis – gads, kā arī pamata mērvienība biomasai un enerģijas plūsmai noteikta slapjās masas vienība t/km². Balstoties uz veikto Saukas ezera izpēti, par modeļa bāzes laika periodu izvēlēts 2020.-2022. gada periods.

Barības tīkla modelī iekļauta informācija no 2020.-2022. gadā veiktajiem lauka pētījumiem A4.1. aktivitātes ietvaros. Detalizēta informācija par paraugu ievākšanas metodikas aprakstu un rezultātu analīzi atrodama projekta atskaitē “Komplekss ezera hidrobioloģiskais, hidroķīmiskais un hidromorfoloģiskais monitorings” (Latvijas Universitāte, 2023).

Informācija par modelī iekļautajiem skaitliskajiem parametriem ir iekļauta 1. pielikumā.

1.3.1. Biomasas

Fitoplanktona biomasas

Pieņemts, ka stacijas, kurās tika ievākti fitoplanktona paraugi, ir reprezentatīvas visam ezeram un ūdens sajaukšanās nodrošina vienmērīgu fitoplanktona organismu izplatību. Fitoplanktona raksturošanai izmantota informācija no ezera centrālās daļas, kur lauka pētījumos paraugi tika ievākti un analizēti visā ūdens stabā. Paraugi ievākti 2021. un 2022. gadā laika posmā no aprīļa līdz novembrim. Mēnešos, kuros fitoplanktona paraugi netika vākti (decembris – marts), tā biomasas samazināšanās tika novērtēta pēc hlorofila-a dinamikas, pieņemot, ka hlorofila-a dinamika ir reprezentatīva fitoplanktona dinamikai. Pārreķins veikts no mg/l uz t/km².

Zooplanktona biomasas

Līdzīgi kā fitoplanktonam, arī šajā gadījumā tika pieņemts, ka stacijas ir reprezentatīvas visam ezeram un zooplanktona grupu daudzums tika rēķināts kā vidējais no analizētajām stacijām. Analīze starp dažādām paraugu ievākšanas vietām un dziļuma zonām neuzrādīja būtisku vietas vai dziļuma ietekmi. Zooplanktona raksturošanai izmantota informācija no 11 analizētajām stacijām 2020. un 2022. gadā. Ziemas mēnešiem pieņemtas 0 vērtības. Pārreķins veikts no mg/m³ uz t/km².

Zoobentosa biomasas

Zoobentosa raksturošanai izmantota informācija no 14 analizētajām stacijām 2020. un 2022. gadā. Aprēķinātā biomasas g/m² ir ekvivalenta t/km². Zoobentosa paraugu ievākšana tika veikta



dažādās dziļuma zonās (0-2 m, 2-4 m, 4-10 m) un biomasas aprēķins veikts, izmantojot svērtos vidējos parametrus proporcionāli dziļuma zonu platībai ezerā (1. tabula). Gliemeņu gadījumā aprēķinātā kopējā biomasā tika pārrēķināta uz biomasu bez čaulas, pieņemot, ka tā veido aptuveni 25 % no pilnās masas un reprezentē masas daļu, kas pilnā apmērā var tikt izmantota ekosistēmā, pārejot uz augstāku barības tīkla līmeni.

Zivju biomasā

Attiecībā uz biomasas novērtēšanu, ezera komplicētākā organismu grupa. Biomasas noteikšana iespējama ar aktīviem zvejas rīkiem (tralis, vads), hidroakustiskām vai iezīmēšanas metodēm (Kubečka et al. 2009). 2022. gada rudenī veiktā kontrolzveja (sadarbībā ar pētniekiem no Čehijas), izmantojot aktīvos zvejas rīkus (tralis un vads), dod iespēju aprēķināt kopējo biomasu noteiktā laukuma vienībā, kā arī novērtēt biomasu pa sugām (pēc sugu sastāva nozvejās).

Zivju sugu sastāva proporcija novērtēta starp dažādām pētījumā izmantotajām zvejas metodēm, no kā pēc tam aprēķināta proporcija habitatēs (1.3.1.1. tabula). Proporcija piekrastes habitatē novērtēta kā vidējā starp elektrozvejas un vada uzskaitēm, savukārt atklātajā daļā kā vidējā starp traļu un tīklu uzskaitēm.

1.3.1.1. tabula. **Zivju sugu proporcija dažādās zvejas metodēs un aprēķinātā proporcija habitatē.**

Krāsas tonis tabulā norāda uz proporciju (sarkana – zema, zaļa – augsta). Ar zilu krāsu iezīmētas zivju sugas, ko izvēlēts iekļaut modelī.

	Zvejas metode				Habitāte (aprēķins)	
	Elektrozveja, %	Tralis, %	Vads, %	Tīkls, %	Piekraste, %	Atklātā daļa, %
Asaris	5,4	15,1	11,8	29,4	8,6	22,3
Ausleja	0,1	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0
Grundulis	0,1	0,0	0,3	0,0	0,2	0,0
Karūsa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ķīsis	0,0	0,0	1,2	0,0	0,6	0,0
Līdaka	23,0	0,1	5,9	4,5	14,4	2,3
Līnis	4,2	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0
Plaudis	24,2	36,7	13,1	20,7	18,7	28,7
Plicis	0,2	0,4	4,5	19,5	2,4	9,9
Rauda	17,1	44,4	35,6	23,8	26,3	34,1
Rudulis	2,8	0,0	1,5	0,6	2,1	0,3
Spidiļķis	0,0	0,0	1,6	0,0	0,8	0,0
Vīķe	15,7	0,8	23,1	0,0	19,4	0,4
Zandarts	7,3	2,4	1,0	1,4	4,1	1,9
Sudrabkarūsa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kopā	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Lauka pētījumos, kopējais zivju daudzums un biomasā visam ezeram tika novērtēta aptuveni 50 kg/ha. Balstoties uz šo novērtējumu, aprēķināta kopējā zivju biomasā katrā habitatē un ezera kopējā biomasā iegūta, summējot abu habitatšu aprēķinātās vērtības. Barības ķēdes modelī tika iekļautas masveidīgākās zivju sugas, kurām aprēķinātās biomasas bija augstākas, pieņemot, ka šīm sugām ir nozīmīgāka loma barības vielu apritē. Modelī iekļautās sugas (asaris, līdaka, līnis, plaudis, plicis, rauda, rudulis, vīķe, zandarts) veido aptuveni 99,6 % no kopējās zivju biomasas ezerā.



Detrita biomasa

Detrita biomasa tika noteikta, izmantojot informāciju par primāro produkciju un eifotiskās zonas dziļumu pēc Christensen and Pauly (1993) funkcijas:

$$\log D = 0.954 \log PP + 0.863 \log E - 2.41$$

kur D – detrita biomasa (mg/C/m^2), PP – primārā produkcija ($\text{mg/C/m}^2/\text{gadā}$), E – eifotiskās zonas dziļums (m). Primārā produkcija tika novērtēta kā $101711 \text{ mg/C/m}^2/\text{gadā}$, eifotiskās zonas dziļums – $3,6 \text{ m}$.

Makrofītu biomasa

Makrofītu funkcionālā grupa tika izdalīta, balstoties barošanās pētījumu rezultātā identificēto makrofītu sastopamību atsevišķu zivju kuņģos. Precīzs makrofītu biomasas novērtējums lauka pētījumos netika veikts. Grupa tika izdalīta, lai indikatīvi atspoguļotu ekosistēmas trofisko struktūru un uzbūvi. Makrofītu biomasa tika pieņemta kā 60 t/km^2 , līdzīgi kā Igaunijas Vertsjerva (Võrtsjärv) ezerā (Bhele et al., 2022). Balstoties uz lauka pētījumu rezultātiem, tika pieņemts, ka makrofīti ezerā pamatā ir sastopami līdz 3 m dziļumam, kas kopā veido $29,4 \%$ no ezera platības (skat. 1.1.1. tabulu).

1.3.2. Produkcija

Viens no modeļa ievades parametriem ir produkcijas/biomasas attiecība (P/B), kas tiešā veidā ir grūti izmērāms lielums. Produkcija ir masas vai enerģijas izmaiņas laika vienībā un ir attiecināma uz organiskā materiāla veidošanos, ietverot arī tos vielu masas vai enerģijas zaudējumus, kas rodas vielmaiņas procesā un organisma bojāejas gadījumā (Wetzel, 2001).

Populācijām, kas atrodas masas balansā (masas daļa, kas papildina funkcionālo grupu, ir vienāda ar masas daļu, kas izplūst no funkcionālās grupas) un kuru biomasa neakumulējas, P/B koeficients ir ekvivalents kopējai mirstībai Z (Allen, 1971).

Zivīm kopējā mirstība tiek noteikta pēc formulas:

$$Z = F + M$$

kur F - zvejas izraisītā mirstība un M - dabiskā mirstība. Zivju funkcionālajām grupām, kas tiek zvejotas, zvejas mirstības raksturošanai (F) tika izmantota informācija par makšķernieku nozvejām pēc atgūtajām licencēm. Zvejas mirstība (F) novērtēta kā attiecība starp nozvejām un kopējo biomasu ezerā. Zivīm, kas netiek makšķerētas, kopējā mirstība (Z) tika pieņemta ekvivalenta dabiskajai mirstībai (M). Dabiskā mirstība (M) tika novērtēta pēc empīriskās attiecības (Pauly, 1980):

$$M = K^{0,65} \times L_{\infty}^{-0,279} \times T_c^{0,463}$$

kur K – konstante no Von Bertalanfi augšanas vienādojuma (VBGF), L_{∞} – asimptotiskais garums (garums, ko indivīds sasniegtu, augot neierobežotu laiku), T_c – vidējā ūdens temperatūra habitatē ($11,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Dabiskā mirstība (M) tika novērtēta pēc empīriskās attiecības (Pauly, 1980) tiešsaistes datubāzē *Fishbase* (Froese and Pauly, 2023), lietojot rīku *Life-history tool* un izmantojot datubāzes noklusējuma iestatījumus attiecībā uz nepieciešamajiem parametriem (L_{∞} un K).

Bentiskajiem bezmugurkaulniekiem P/B koeficients tika noteikts pēc Brey (2012) metodoloģijas Brey (2011) datubāzē, balstoties uz informāciju par konkrētām funkcionālajām grupām



vai tām tuvu stāvošiem taksoniem. Aprēķinu veikšanai izmantota informācija par organismu individuālo ķermeņa masu (izteikta džoulos), piegrunts ūdens temperatūru (11,2 °C) un vidējo dziļumu (4,8 m). Konversācijas faktori (attiecība starp ķermeņa slapjo un sauso masu) un enerģētiskās vērtības (džouli uz ķermeņa masas vienību) iegūti, balstoties uz Brey (2001) datubāzi.

Makrofītu P/B koeficients tika pieņemts līdzīgi Igaunijas Vertsjerva (Võrtsjärv) ezeram 1,5 (Bhele et al., 2022).

Fitoplanktona primārā produkcija aprēķināta, balstoties uz Saukas ezerā ievāktajiem fizikāli ķīmiskajiem parametriem – hlorofila a koncentrācija (5,3 µg/l), ūdens caurredzamība pēc Seki diska (2 m), kā arī ūdens virsējā slāņa temperatūras (11,2 °C). Dotajiem parametriem aprēķinātas vidējās vērtības pētījuma veikšanas periodā, raksturojot ezera vidējo stāvokli gada griezumā. Seki diska dziļums izmantots, lai aprēķinātu eifotiskās zonas dziļumu ar attiecību 1:1,84 pēc reģionā veiktiem pētījumiem (Borowiak D. and Borowiak M. 2016). Vidējā fitoplanktona pirmprodukcija aprēķināta, balstoties uz dziļumintegrētu modeli (Behrenfeld & Falkowski 1997a, Behrenfeld & Falkowski 1997b, Fahey & Knapp 2007):

$$PP = C_{surf} \times Z_{eu} \times P^b_{opt} \times DL \times F$$

kur PP – pirmprodukcija; C_{surf} – hlorofila koncentrācija pie ūdens virsmas, Z_{eu} – eifotiskais dziļums, kurā gaismas intensitāte sarūk līdz 1 % no virsmas vērtības; P^b_{opt} – maksimālais hlorofilam specifiskais oglekļa fiksācijas ātrums ūdens kolonnā; DL – vidējais dienas ilgums (fotoperiods) (10 stundas); F – relatīvā potenciālās fotosintēzes daļa, kas zaudēta eifotiskajā zonā gaismas ierobežojuma dēļ.

P^b_{opt} šajā modelī aprēķināts kā atkarība no ūdens virsējā slāņa temperatūras (Behrenfeld & Falkowski 1997a):

$$P^b_{opt} = 0,118 \times T^0 + 1,25$$

F (relatīvā potenciālā fotosintēzes daļa) aprēķināta, izmantojot E_0 (diennakts virsmas gaismas starojums, kas pieejams fotosintēzei) (Behrenfeld & Falkowski 1997a), kura vērtība iegūta no Baltijas jūras virsmas vidējās vērtības (pieņemot, ka šīs vērtības ir reprezentatīvas visam reģionam atbilstoši platuma grādiem) gadā no 2005.-2009. gadam (EMODnet Seabed Habitats 2016):

$$F = \left(\frac{0,66125 \times E_0}{E_0 + 4,1} \right)$$

Aprēķinātā Saukas ezera gada vidējā fitoplanktona pirmprodukcija ir 286 mgC m⁻² dienā, kas atbilst mezotrofa ezera statusam.

1.3.3. Patēriņš

Funkcionālo grupu barības patēriņš tiek raksturots pēc patēriņa/biomasas attiecības (Q/B). Šis koeficients norāda uz patērētās barības masas attiecību pret organisma biomasu. Piemēram, ja funkcionālās grupas Q/B koeficients ir 10, tas nozīmē, ka funkcionālā grupa gada laikā patērē 10 reizes vairāk barības objektu salīdzinājumā ar pašas funkcionālās grupas biomasu ekosistēmā.

Zivju funkcionālajām grupām barības patēriņš tika raksturots, balstoties uz literatūras datiem (Palomares and Pauly 1989;1998) un aprēķiniem tiešsaistes datubāzē *Fishbase* (Froese and Pauly,

2023), izmantojot rīku *Life-history tool*. Aprēķiniem definēta vidējā ūdens temperatūra (11,2 °C) un barošanās veids.

Bentosa un zooplanktona funkcionālajām grupām Q/B koeficients tika novērtēts pēc P/B un P/Q koeficienta vērtībām, pieņemot, ka P/Q attiecība ir 0,2 bentosam un 0,3 zooplanktonam (Christensen *et al.* 2008).

1.3.4. Barības sastāvs

Barības sastāvs raksturo barības objektu masas procentuālo proporciju patērētāja racionā (1. pielikuma P3 tabula).

Pieņemts, ka visas zooplanktona grupas barojas ar fitoplanktonu. Zoobentosa grupu barības sastāvs noteikts, balstoties uz projektā iesaistīto zoobentosa ekoloģijas ekspertu vērtējumu.

Zivju barošanās raksturošanai izmantoti lauka pētījumos ievāktie kuņģu dati. Tika pieņemts, ka zivju barības sastāvs ir atkarīgs no to izmēra – garuma. Zivju funkcionālās grupas tika sadalītas garuma grupās (solis – 5 cm) un katrai garuma grupai tika aprēķināts dažādu barības objektu grupu summārais daudzums, kas raksturo dotās garuma grupas barošanos pēc apēsto barības objektu kopējās masas. Tā kā pēc garuma grupām populācijas struktūra zivīm ir nevienmērīga, tika ņemts vērā sugu garuma grupu procentuālais sastāvs populācijā. Zivju garuma grupu sastāvs tika noteikts pēc visu rīku kopējām nozvejām. Pēc tam aprēķinātā barošanās pa zivju garuma grupām (pēc apēsto barības objektu kopējās masas) tika attiecināta uz aprēķināto garuma grupu sastāvu populācijā. Rezultātā aprēķinātā svērtā vidējā barošanās zivju funkcionālajām grupām.

Līdaku un zandartu gadījumā ievāktais kuņģu skaits ar barības objektiem bija pārāk neliels, lai veiktu vispārīgus secinājumus par šo sugu barošanos, tāpēc barības sastāvs tika aprēķināts, balstoties uz pārējo zivju sugu produkciju, t.i., pieņemot, ka barībā vairāk tiks patērētas tās sugas, kuru ilgtermiņa produkcija ir augstāka (masveidīgākās sugas).

1.3.5. EwE modeļa parametrizācija

Pēc modeļa pamatstruktūras izveides tika pārbaudīta tā atbilstība ekoloģiskajām pamatsakarībām, izmantojot PreBal pieeju (Link 2010), kā arī veikta modeļa balansēšana, lai tas būtu stabils (Christensen *et al.* 2008; Heymans *et al.* 2016). Nepieciešamības gadījumā tika veikta parametrizācija, mainot modeļa ievades parametrus. Izveidotajam modelim ir jāraksturo barības ķēde pēc iepriekš minētā “masas balansa” principa – masas daļa, kas papildina funkcionālo grupu, ir vienāda ar masas daļu, kas izplūst no funkcionālās grupas. Viens no parametriem, kas modelī raksturo barības ķēdi, ir funkcionālās grupas ekotrofiskā efektivitāte (EE), kas norāda uz grupas daļu, kas pāriet uz nākošo barošanās līmeni. EE koeficientam ir jābūt starp 0 un 1, attiecīgi, ja grupa netiek izmantota vispār, vai tiek izmantota pilnībā. Koeficients, kas pārsniedz 1, norāda uz to, ka ar esošajiem modeļa parametriem funkcionālās grupas patēriņš ekosistēmā pārsniedz tās produkciju, kas neatbilst “masas-balansa” principam. *Ecopath* modeļa parametrizācijas mērķis ir panākt, lai EE koeficienti būtu samērīgi un nepārsniegtu vērtību 1, kas liecina par balansētu barības ķēdes struktūru. Parametrizācija tika veikta, manuāli mainot *Ecopath* modeļa ievades parametrus (parametri ar lielāko nenoteiktību) šādā secībā:

- 1) mainot barības sastāvu;



2. Rezultāti

2.1. Ekosistēmas struktūra

Izveidotais Saukas ezera barības tīkla ekosistēmas modelis sastāv no 23 funkcionālajām grupām, kas atspoguļo svarīgākos ezera ekosistēmas komponentus. Modeļa ievades parametri ir ietverti 1. pielikumā.

Pirmproducentus veido divas funkcionālās grupas – **Fitoplanktons** un **Makrofīti**. Šīs grupas sevī ietver dažādas sugas. Piemēram, fitoplanktona grupa sastāv no septiņiem dažādiem aļģu nodalījumiem – kramaļģēm (*Bacillariophyta*), zilaļģēm (*Cyanophyta*), zaļaļģēm (*Chlorophyta*), dinofītaļģēm (*Dinophyta*), zeltainajām aļģēm (*Chrysophyta*), kriptofītaļģēm (*Cryptophyta*) un eiglēnaļģēm (*Euglenophyta*). Makrofītu grupā ietilpst vaskulārie augi, mieturaļģes, sūnas un pavedienveida zaļaļģes.

Zooplanktons sastāv no trīs funkcionālām grupām – **Rotifera**, ko veido *Keratella* spp., *Conochillius* sp., *Gastropus stylifer*, *Polyarthra* spp., *Asplanchna priodonta*, *Synchaeta* sp. u.c., **Cladocera**, ko galvenokārt veido *Daphnia* spp., *Bosmina crassicornis* un *Bosmina longirostris*, *Diaphanosoma brachyurum*, *Chydorus* sp., un **Copepoda**, ko galvenokārt veido *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides*, *Eudiaptomus graciloides* un to kopepodīti.

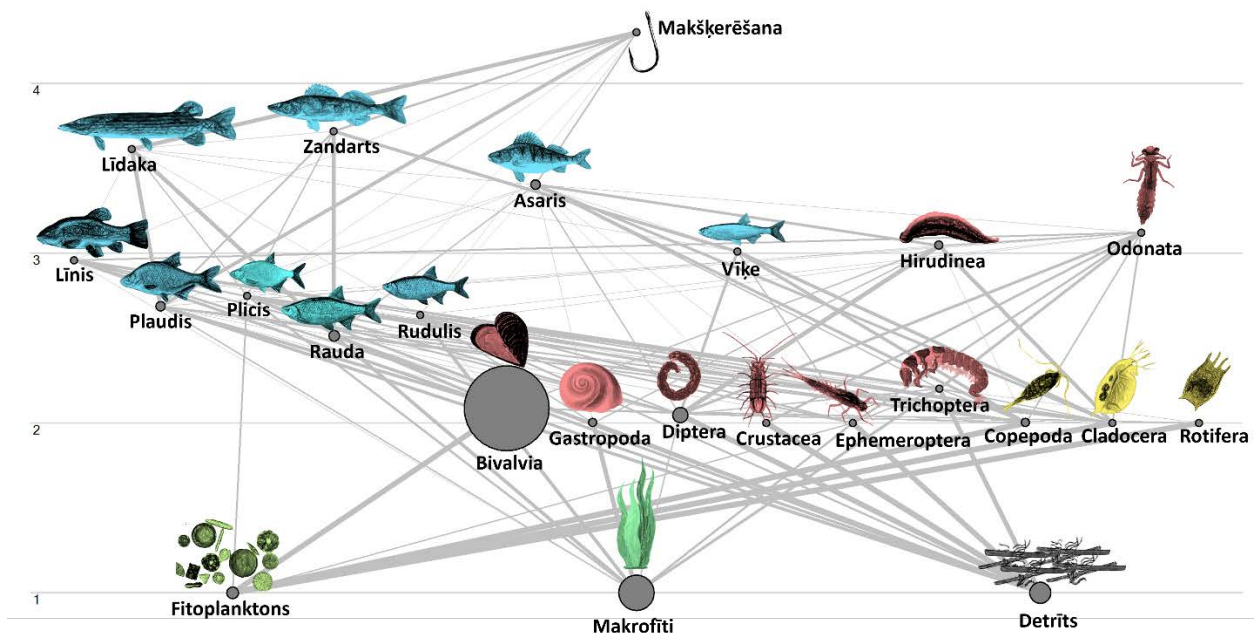
Zoobentoss sastāv no astoņām funkcionālām grupām – **Bivalvia**, ko galvenokārt veido mainīgā sēdgliemene (*Dreissena polymorpha*), bezzobes (*Anodonta* spp.) un perlamutrenes (*Unio pictorum*), **Gastropoda**, kas sastāv no tādiem gliemežiem kā bitīnija (*Bithynia tentaculata*), parastā valvāta (*Valvata piscinalis*) u.c., **Diptera**, ko veido trīsuļodu Chironomidae kāpuri, stiklodi (*Chaoborus flavicans*) u.c., **Crustacea**, ko pamatā veido vienādkājvēži Isopoda – ūdensēzeliši (*Asellus aquaticus*), **Ephemeroptera**, ko veido Caenidae dzimtas viendienītes (*Caenis horaria*, *C. luctuosa*, *C. lactea*) u.c., **Hirudinea**, kur dominējošās sugas bija mazā plātņdēle (*Helobdella stagnalis*) un astoņacu rīkldēle (*Erpobdella octoculata*), **Odonata**, ko veido spāru kāpuri, un **Trichoptera**, ko veido Polycentropodidae, Ecnomidae, Phryganeidae, Limnephilidae un Molannidae dzimtas makstenes.

Zivis sastāv no deviņām funkcionālām grupām, kas ir izdalītas sugu līmenī – **Līdaka**, **Zandarts**, **Asaris**, **Linis**, **Plaudis**, **Plicis**, **Rauda**, **Rudulis**, **Vīķe**.

Detrītu veido viena funkcionālā grupa, kas ietver gan suspendēto, gan sedimentēto detrītu.

Shematiska *Ecopath* modeļa barības tīkla struktūra un saistības starp grupām ir redzamas 2.1.1. attēlā. Pēc barošanās attiecībām funkcionālās grupas veido 4 barošanās jeb trofiskos līmeņus. Zemākajos līmeņos atrodas pirmproducenti un noārdītās vielas (detrīts). Augstākajos līmeņos atrodas tie organismi, kas barojas ar barības ķēdē augstāk stāvošiem organismiem. Intensīvākā enerģijas (biomasas) plūsma ir novērojama no fitoplanktona un detrīta funkcionālajām grupām. Augstākā vidējā biomasas stāvošā barības tīklā ir Bivalvia funkcionālajai grupai (115 t/ km²), ko pamatā nosaka augstā *Dreissena polymorpha* biomasas.





2.1.1. attēls. Sauskas ezera barības tīkla struktūra un sasaiste starp dažādām funkcionālajām grupām un makšķerēšanu. Apļa izmērs ir proporcionāli funkcionālās grupas biomasai ekosistēmā (t/km^2). Līnijas biezums ir proporcionāls enerģijas plūsmas intensitātei.

2.2. Biomasa un produkcija

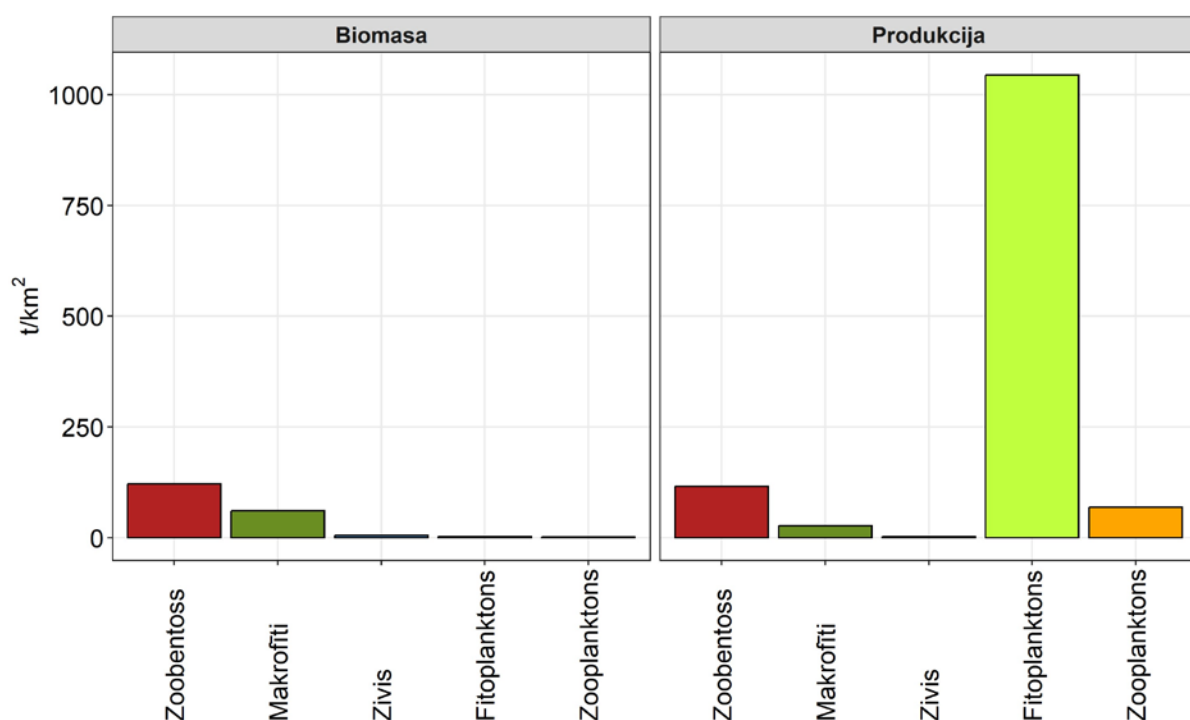
Balstoties uz modeli iekļauto P/B attiecību un biomasu (B), katrai grupai ir iespējams aprēķināt produkciju gada griezumā un salīdzināt to ar vidējo biomasu.

Ja pēc vidējās biomasas barības tīklā dominē zoobentoss, tad pēc kopējās gada produkcijas dominē fitoplanktons, kura produkcija gada griezumā sastāda $1044 t/km^2$. Zoobentosa produkcija veido $116 t/km^2$ un zooplanktona produkcija $69 t/km^2$ (2.2.1. attēls).

Novērotās atšķirības starp biomasas un produkcijas sadalījumā ir skaidrojamas ar modeli ietvertajiem P/B koeficientiem, kas raksturo produkcijas intensitāti un vielu apriti (*turnover rate*). Zemāko trofisko līmeņu grupām šis koeficients ir augstāks (1. pielikuma P1. tabula), līdz ar to kopējās produkcijas potenciāls ir lielāks. Zoobentosa organismiem P/B attiecība tuvu 1, tāpēc kopējā produkcija ir līdzīga vidējai biomasai.

No barības tīkla funkcionālā skatpunkta lielākā nozīme ir organismu grupām ar augstāku kopējo gada produkciju. Hidroekosistēmās lielāko produkcijas daļu sastāda pirmproducenti (fitoplanktons), jo tie veido pamatu pārējam barības tīklam un ietekmē kopējo ekosistēmas produktivitāti. Sauskas ezera fitoplanktona kopējā produkcija, salīdzinot ar eitrofiem ezeriem, ir vērtējama kā samērā zema. Piemēram, fitoplanktona produkcija Igaunijas Vertsjerva (Vörtsjärv) ezerā veido $5498 t/km^2$ (Cremona et al., 2018).



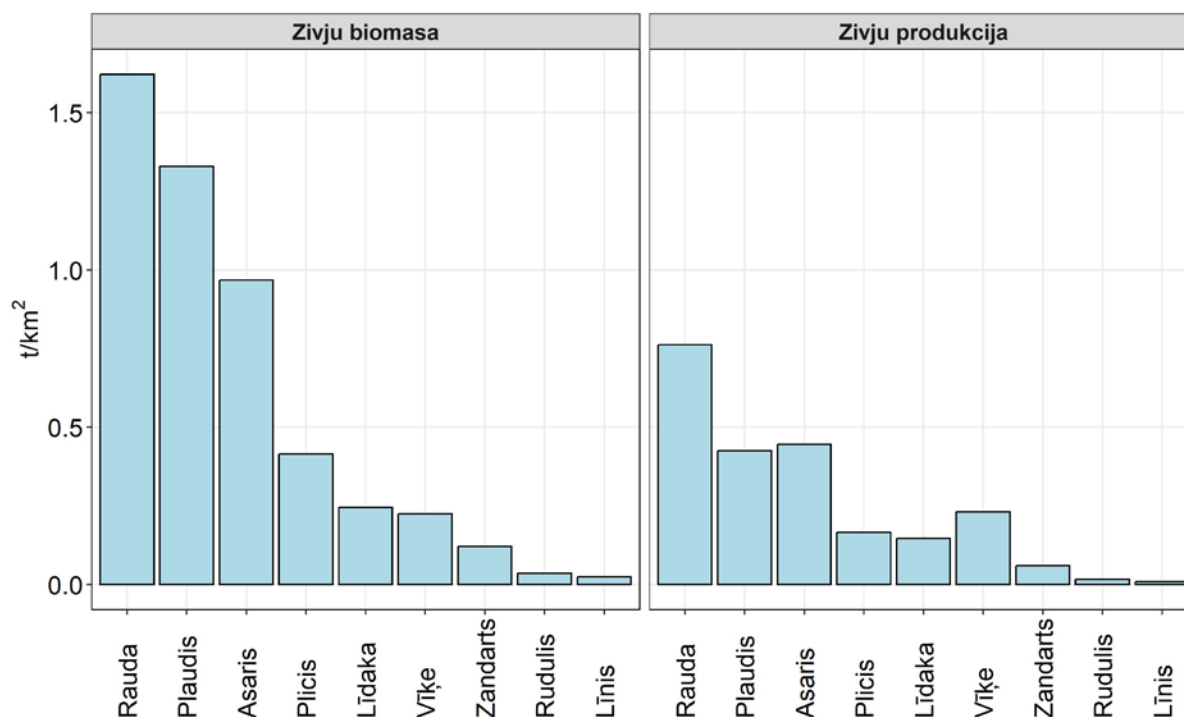


2.2.1. attēls. Saukas ezera barības tīkla organismu grupu vidējā biomasa un kopējā produkcija ($t/km^2/gads^{-1}$).

Saukas ezeram aprēķinātās zivju biomasas un sugu sadalījums redzams 2.2.2. attēlā. Kopā pētījumu laikā ezerā tika konstatētas 15 zivju sugas (asaris, ausleja, grundulis, karūsa, ķīsis, līdaka, līnis, plaudis, plicis, rauda, rudulis, spīdīķis, sudrabkarūsa, vīķe, zandarts), taču modelī tika ietvertas 9 masveidīgākās zivju sugas, kas veidoja 99,6 % no kopējās zivju biomasas ezerā. Šo sugu kopējā biomasa bija 34,86 t, jeb $4,98 t/km^2$. Pēc biomasas dominēja rauda, plaudis un asaris (79 % no kopējās zivju biomasas). Plēsīgās zivis (līdaka un zandarts) veidoja 7,3 % no kopējās zivju biomasas.

Dominējošo zivju grupu sadalījums pēc kopējās produkcijas bija samērā līdzīgs biomasas sadalījumam (2.2.2. attēls). Attiecībā pret biomasu, augstāka produkcija ir ātri augošām sugām, piemēram vīķei. Gada kopējā produkcija zivīm ir zemāka par to vidējo biomasu (P/B koeficients < 1).

Zivju aprēķinātās biomasas ir jāuztver kā to minimālās biomasas ezerā. Pieļaujams, ka daļa no zivīm, it īpaši izmēros lielāki īpatņi, spēj izvairīties no aktīvās zvejas rīkiem, līdz ar to reālais zivju blīvums uz laukuma vienību varētu būt lielāks. Dažādu metožu izmantošana (tralis, vads, elektrozeveja, tīkls), vairāku atkārtojumu skaits un plašais staciju tīkls, veiktajā pētījumā ļauj uzlabot precizitāti sugu sastāva noteikšanā.

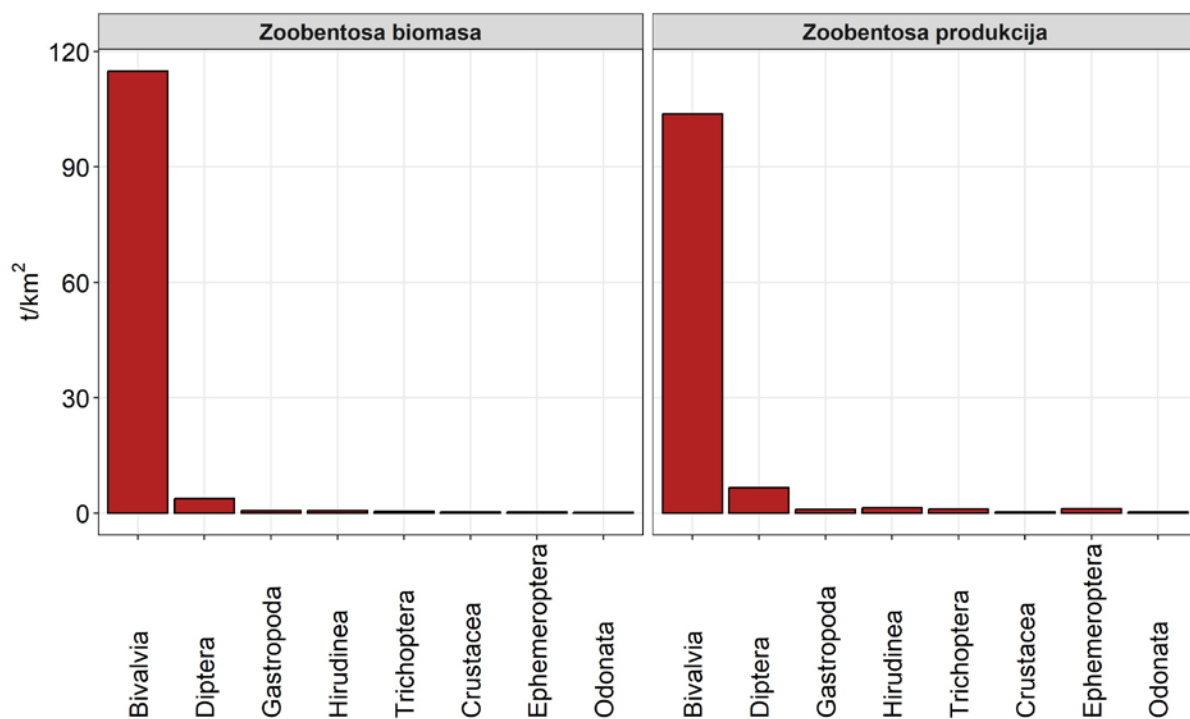


2.2.2. attēls. Saukas ezera barības tīkla zivju funkcionālo grupu gada vidējā biomasa un kopējā produkcija ($\text{t/km}^2/\text{gads}^{-1}$).

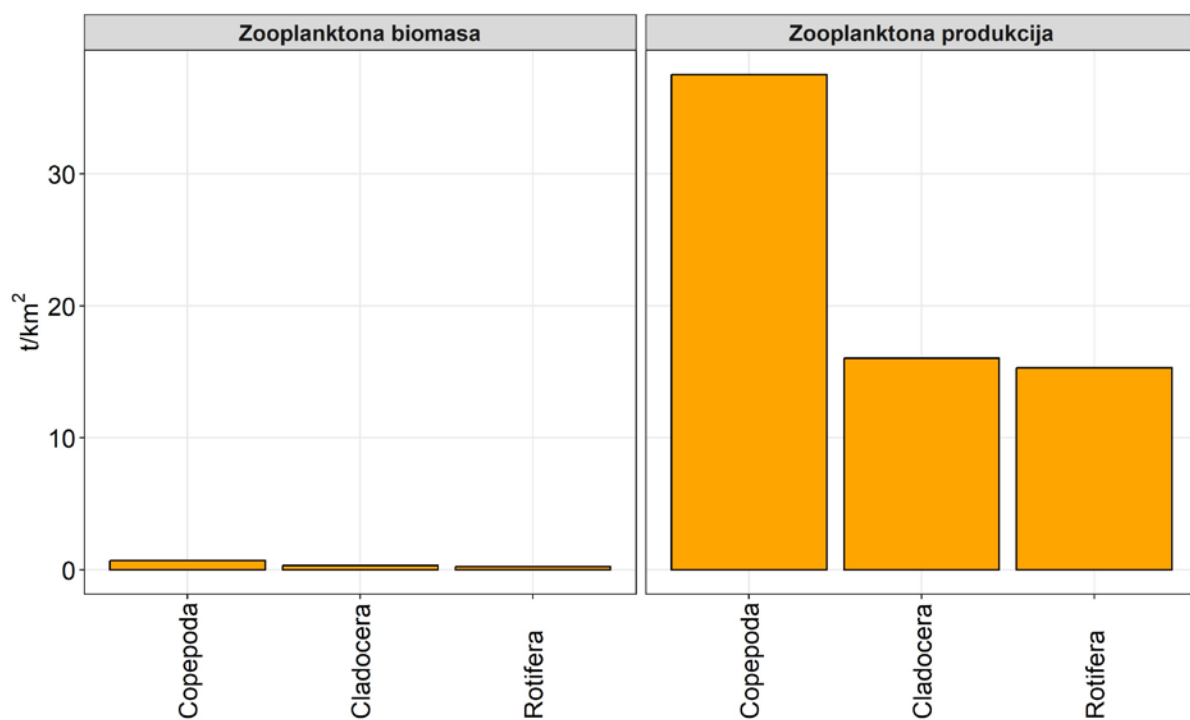
No zoobentosa organismiem lielāko biomasu sastāda *Bivalvia* gliemenes (pamatā *Dreissena polymorpha*), kas arī veido lielāko produkcijas daļu (2.2.3. attēls). Zoobentosa organismiem P/B attiecība ir tuva 1, tāpēc gada kopējā produkcija ir līdzīga vidējai biomasai. Bieži ekosistēmu pētījumos ar EwE modelēšanas metodi zoobentosa organismu grupas tiek apvienotas vienā funkcionālā grupā. Neraugoties uz salīdzinoši zemajām citu zoobentosa organismu grupu biomasām Saukas ezerā, zoobentosa organismi tika izdalīti vairākās grupās, jo izpētes rezultāti ļāva veikt zoobentosa biomasas aprēķinus un novērtēt to lomu barības tīklā (sastopamība zivju kuņģos) ar salīdzinoši augstu izšķirtspēju. *Bivalvia* grupas biomasa ($114,9 \text{ t/km}^2$) un produkcija (104 t/km^2) ir vērtējama kā ļoti augsta. Ņemot vērā augsto gliemeņu (*Bivalvia*) biomasas variāciju starp dažādām paraugu ievākšanas stacijām, pieļaujams, ka šīs zoobentosa grupas biomasas aprēķinā ir augstāka nenoteiktība.

Zooplanktona funkcionālajām grupām, atšķirībā no citiem organismiem, starp grupām nebija vērojamas liela mēroga atšķirības biomasas sadalījumā (2.2.4. attēls). Kopējā produkcija būtiski pārsniedza vidējo biomasu un augstāko produkcijas daļu veidoja Copapoda grupas zooplanktona organismi (38 t/km^2).





2.2.3. attēls. Saukas ezera barības tīkla zoobentosa funkcionālo grupu vidējā biomasa un kopējā produkcija ($\text{t/km}^2/\text{gads}^{-1}$).

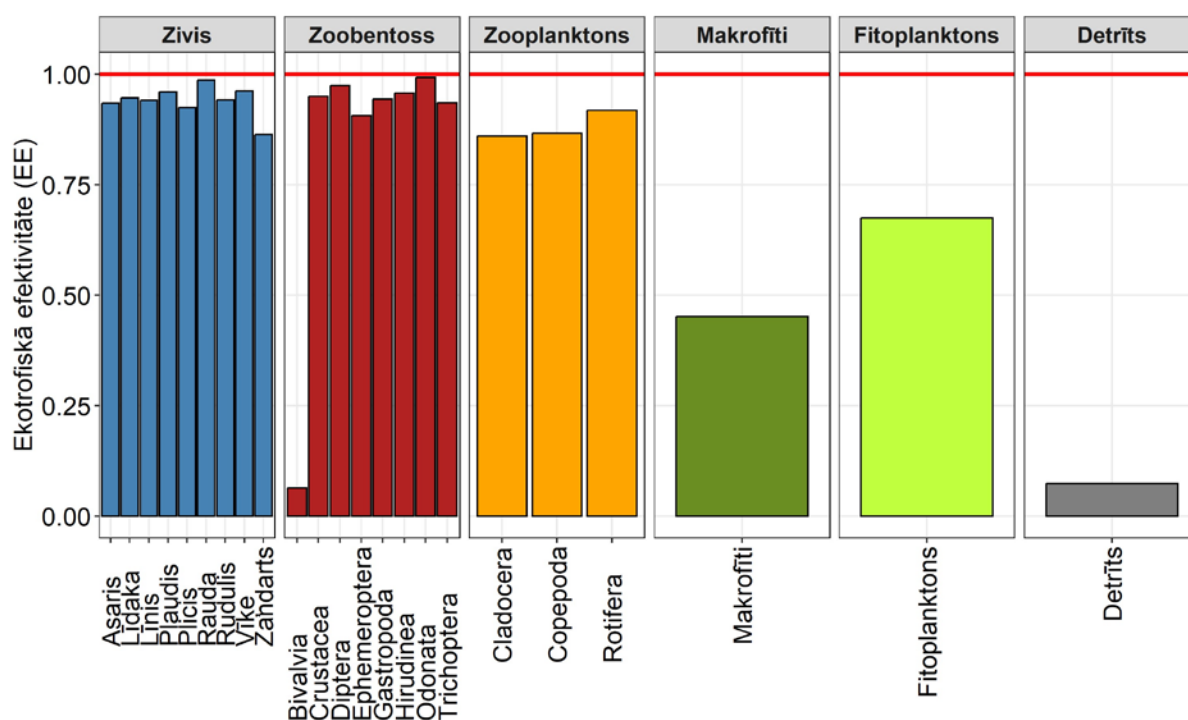


2.2.4. attēls. Saukas ezera barības tīkla zooplanktona funkcionālo grupu vidējā biomasa un kopējā produkcija ($\text{t/km}^2/\text{gads}^{-1}$).

2.3. Ekotrofiskā efektivitāte

Ekotrofiskās efektivitātes koeficienti norāda uz barības ķēdes funkcionālo grupu produkcijas tālāko virzību. Tā ir attiecība starp atsevišķa organisma kopējo patēriņu (izēšana) un tā produkciju modelētajā ekosistēmā. Augsts koeficients norāda uz efektīvu produkcijas masas pārnesei uz augstākiem barības tīkla līmeņiem, savukārt zemas vērtības norāda uz biomasas akumulēšanos un tam sekojošu detrīta veidošanos.

Kopumā Saukas ezera barības tīkla modeļa funkcionālo grupu ekotrofiskā efektivitāte ir vērtējama kā augsta. 2.3.1. attēlā redzams, ka zivju, zoobentosa un zooplanktona grupām vairumā gadījumu tā ir virs 0,8. Tas nozīmē, ka esošais modelis spēj izskaidrot tālāko iekļaušanos barības tīklā 80 % no šo grupu produkcijas. Sākotnēji, veidojot modeli, vairumam grupu EE vērtības pārsniedza 1, kas nozīmē, ka pēc sākotnējiem uzstādījumiem barības tīklā ir nepieciešamas augstākas šo grupu biomasas, lai nodrošinātu pārējo grupu barošanās vajadzības. Modeļi bija iespējams “nobilansēt” atbilstoši ekoloģiskajiem kritērijiem, korigējot barības sastāvu un koeficientu P/B un Q/B vērtības. Ļoti zema EE vērtība ir gliemenēm Bivalvia – tikai 6 % no šīs grupas produkcijas iekļaujas barības tīkla augstākajos līmeņos. Tā kā precīzs makrofitu biomasas novērtējums netika veikts, nav iespējams izdarīt pamatotus secinājumus par šī grupas EE vērtībām. Sagaidāms, ka vairumā gadījumu makrofitu EE vērtībai vajadzētu būt salīdzinoši zelai. Fitoplanktona EE vērtība ir vērtējama kā augsta (0,67) – tas nozīmē, ka lielākā daļa fitoplanktona produkcijas tiek asimilēta barības tīkla augstākajos līmeņos. Zemā detrīta vērtība (0,07) norāda uz biomasas akumulāciju, kas ezeru ekosistēmām ir tipiski.



2.3.1. Saukas ezera barības tīkla zooplanktona funkcionālo grupu ekotrofiskā efektivitāte.

Horizontālā sarkanā līnija norāda uz vērtību 1.



2.4. Patēriņš un produkcija

Balstoties uz barības tīkla modeļa rezultātiem, iespējams novērtēt atsevišķu funkcionālo grupu lomu ekoloģisko grupu patēriņa un produkcijas veidošanā (2.4.1. attēls).

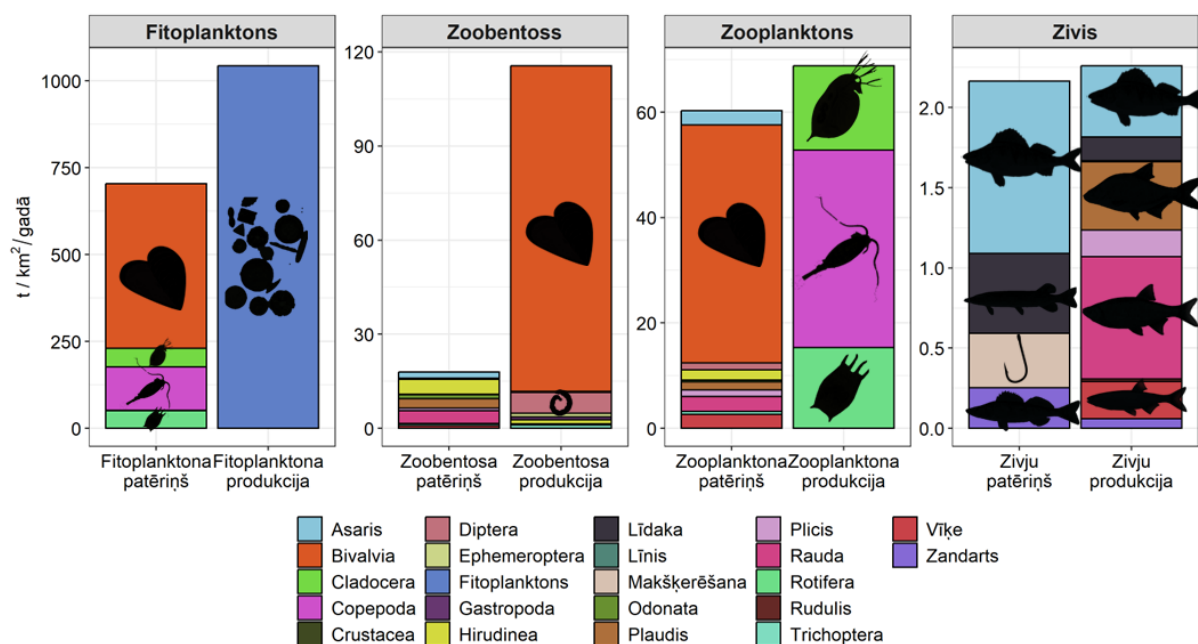
Galvenās fitoplanktonu patērējošās grupas ir Bivalvia, Copepoda, Cladocera un Rotatoria. Šīs grupas kopā patērē 704 t/km² fitoplanktona produkcijas gadā, kas attiecībā pret fitoplanktona produkciju (1044 t/km²) veido EE koeficienta vērtību (0,67). Pieļaujams, ka modelī izmantotā fitoplanktona P/B aprēķinā ir iespējama nenoteiktība. Ja fitoplanktona P/B vērtība būtu mazāka par 300, tad tā EE vērtība pārsniegtu 0,9. Uz veiksmīgu fitoplanktona ieļaušanos barības tīklā norāda arī sezonālā fitoplanktona un zooplanktona dinamika. Zemākais fitoplanktona biomasas periods vasaras periodā ir jūnijā, kas sakrīt ar augstāko zooplanktona biomasas periodu un liecina par lejupvērsta kontroles mehānisma (*top-down*) efektu.

Zoobentosa grupas produkciju pārsvarā veido gliemenes Bivalvia, kas vāji iekļaujas barības tīklā. Galvenie zoobentosa patērētāji ir zivis un plēsīgās zoobentosa organismu grupas. Vairums no pārējiem zoobentosa organismiem labi iekļaujas barības tīklā un ir ar augstām EE vērtībām (2.3.1. attēls). Gliemenes (pamatā *Dreissena polymorpha*) ir svarīgs barības komponents vairākām karpveidīgo zivju sugām. To zemais patēriņš barības tīklā var būt skaidrojams ar zemu karpveidīgo sugu daudzumu (barošanās ietekme), kā arī ar iespējamu nenoteiktību grupas biomasas novērtējumā.

Zooplanktona patēriņu galvenokārt ietekmē augstā gliemeņu Bivalvia biomasā. Neraugoties uz to, ka modelī zooplanktons veido tikai nelielu daļu (9 %) no gliemeņu barības patēriņa (1. pielikuma P3. tabula), lielās gliemeņu biomasas dēļ to ietekme uz zooplanktona produkciju ir augsta. Zooplanktonu patērē arī vairums zivju sugu. Agrīnajās attīstības stadijās ar to barojas arī plēsīgo zivju sugas. Zooplanktona sezonālā dinamika ar biomasas samazinājumu jūlijā liecina par iespējamu lejupvērsta kontroles mehānisma (*top-down*) efektu, ko rada zivju barošanās. Vasaras periodā, kad ūdens temperatūra ir augstāka, zivju barošanās intensitāte pieaug. Tā kā vairumam sugu nārsta periods ir pavasarī un vasaras sākumā, sagaidāms, ka vasaras vidū zivju mazuļu ietekme uz zooplanktonu ir visaugstākā.

Zivju patēriņš ir ļoti tuvs to produkcijai. Galvenās plēsīgās zivju sugas, kas veido citu zivju patēriņu, ir asaris, līdaka un zandarts. Salīdzinoši nozīmīgu daļu sastāda arī makšķerēšanas ietekme (0,34 t/km²). Galvenās sugas, kas veido zivju produkciju, ir rauda, plaudis, asaris un viķe. Veicot sākotnējo zivju biomasas novērtējumu modelī, aprēķinos izmantotā biomasā (50 kg/ha) tika vērtēta kā zema, jo saskaņā ar pagājušā gadsimta totālās apzvejas rezultātiem tika secināts, ka zivju biomasā Latvijas apstākļos eitrofos ezeros ir ap 200-250 kg/ha, bet mezotrofos 80-150kg/ha (Birzaks, 2007). Parametrizējot modeli, tika secināts, ka esošās barības tīkla funkcionālās grupas nespēj nodrošināt būtiski augstāku zivju biomasu ekosistēmā un liela daļa tiek izmantota tuvu to EE līmenim. Vienīgais brīvi pieejamais barības bāzes komponents ezera ekosistēmā ir gliemenes, kas, saskaņā ar lauka pētījumu rezultātiem, vāji iekļaujas barības tīklā. Parametrizējot modeli, gliemeņu Bivalvia īpatsvars zivju barības sastāvā tika palielināts, lai nodrošinātu pārējo zoobentosa grupu EE mazāku par 1.





2.4.1. attēls. Saukas ezera barības tīkla galveno ekoloģisko grupu patēriņš un produkcija ($t/km^2/gads^{-1}$). Y skalām ir dažādas vērtības – rezultāti nav tiešā veidā salīdzināmi starp dažādām ekoloģiskām grupām.

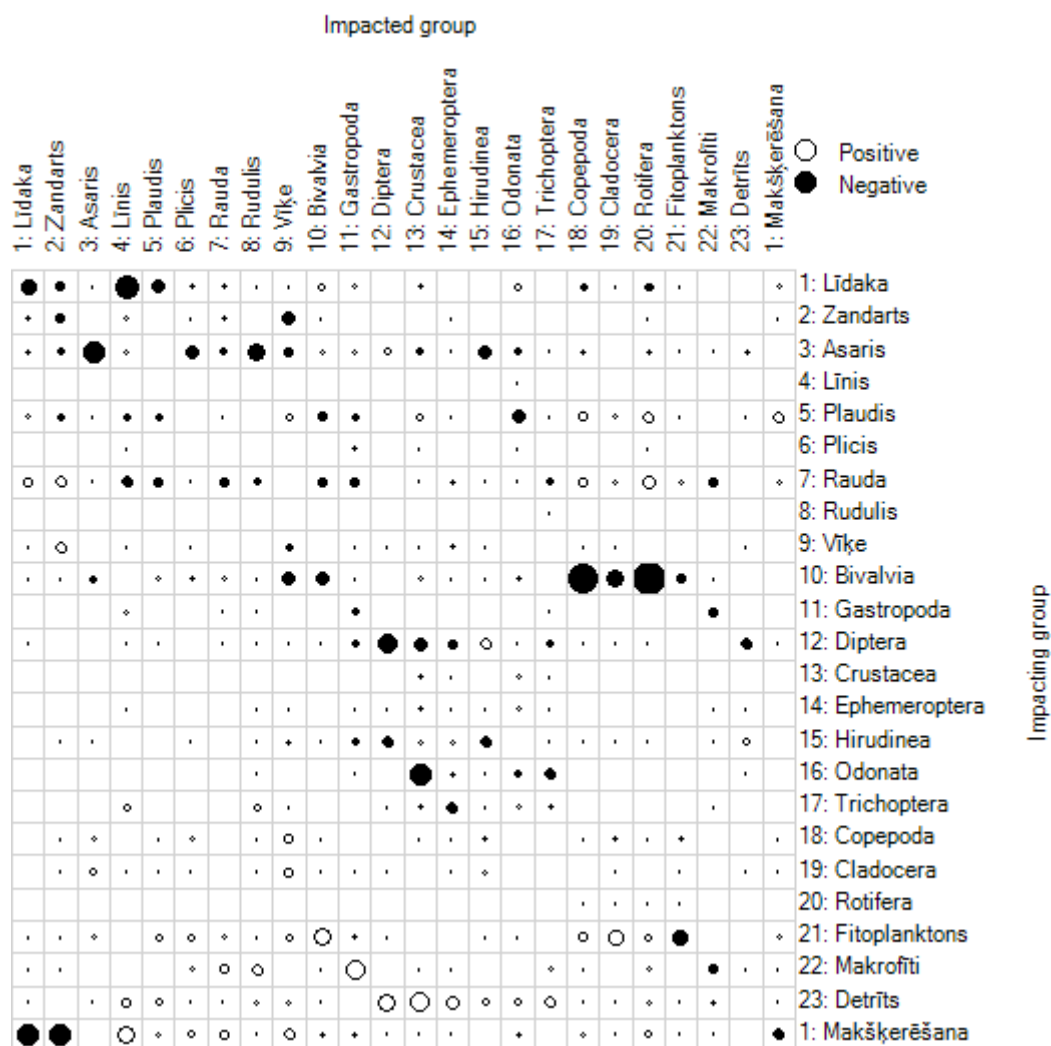
2.5. Savstarpējā ietekme

Pēc funkcionālo grupu savstarpējās ietekmes redzams, ka būtiskākā ietekme ir gliemenēm Bivalvia, kas negatīvi ietekmē savus galvenos barības objektus un pārējās planktonēdājas sugas, konkurējot par barības resursiem (2.5.1. attēls). Šis attēls palīdz parādīt arī netiešās ietekmes starp dažādām grupām – pirmā suga ietekmē otro sugu, kuras biomasas izmaiņas ietekmēt trešo sugu, kura, savukārt, ietekmē ceturto sugu u.t.t.

Plēsīgās zivis negatīvi ietekmē savus galvenos barības objektus – citas zivis, taču ietekme uz citām grupām, piemēram, gliemenēm Bivalvia var būt pozitīva, jo plēsonības rezultātā tiek izēstas zivis, kas barojas ar gliemenēm. Zivis, kas barojas ar zoobentosa organismiem savstarpēji konkurē, tāpēc starp šīm grupām ietekme ir negatīva. Atsevišķām zivju grupām ir pozitīva ietekme uz zooplanktonu, neraugoties uz to, ka šīs grupas to patērē, piemēram, plaudis un rauda. Šāda ietekme ir skaidrojama ar to, ka plauži un raudas patērē arī Bivalvia grupas gliemenes. Gliemeņu patēriņš šo zivju uzturā ir lielāks par zooplanktonu – pieaugot šo grupu biomasai, palielinās izēšanas spiediens uz Bivalvia grupu, pēc kā samazinās Bivalvia grupas radītais izēšanas spiediens uz zooplanktonu.

Nozvejas (makšķerēšana) negatīvi ietekmē galvenās sugas, kas ir makšķernieku lomos (līdaka, zandarts), bet ietekme uz pārējām zivju sugām ir pozitīva, jo samazina to plēšēju daudzumu. Vairāku funkcionālo grupu negatīvā ietekme attiecībā uz sevi ir skaidrojama ar iekšējās konkurences palielināšanos biomasas pieauguma rezultātā. Savstarpējā ietekme pamatā ir atkarīga no barošanās attiecībām un nišas konkurences. Lielākā pozitīvā ietekme ekosistēmā ir zemāko trofisko līmeņu organismiem – detritā, makrofītu, fitoplanktona un zooplanktona grupām.





2.5.1. attēls. **Saukas ezera barības tīkla funkcionālo grupu savstarpējā ietekme.** Aplā izmērs norāda uz ietekmes stiprumu, bet krāsa uz ietekmes veidu (balts – pozitīva, melns – negatīva). Ietekmējošās grupas (*impacting group*) ir uz vertikālās ass, bet ietekmētās grupas (*impacted group*) ir uz horizontālās ass.

2.6. Ekosistēmas indikatori

Ekosistēmas plūsmas un kopējie indikatori ir apkopoti 2.6.1. tabulā. Kopējā masa plūsma caur ekosistēmu bija 2542 t/km²/gadā, no kā 33 % tika patērēti (842 t/km²/gadā), 23 % eksportēti (584 t/km²/gadā), 19 % respirēti (487 t/km²/gadā) un 25 % veidoja detritu (629 t/km²/gadā). Attiecība starp kopējo pirmprodukciju un kopējo respirāciju bija 2,2, kas norāda, ka sistēma ir attīstības procesā. Šī attiecība (TPP/TR) raksturo sistēmas attīstības fāzi – vērtības, kas ir tuvas 1, norāda uz nobriedušu sistēmu.

Salīdzinot šos rādītājus ar Igaunijas Vertsjerva (Võrtsjärv) ezeru, kur ir izveidots līdzīgs ekosistēmas modelis (Cremona et al., 2018), secināms, ka Saukas ezera produkcija ir aptuveni piecas reizes zemāka nekā Vertsjerva ezerā, kurš ir sekls un eitrofs ezers (2.6.2. tabula).

2.6.1. tabula. Saukas ezera ekosistēmas modeļa izejas indikatori.

Indikators	Vērtība	Mērvienība
Visa patēriņa summa	842	t/km ² /gadā
Visa eksporta summa	584	t/km ² /gadā
Visu respirācijas plūsmu summa	487	t/km ² /gadā
Visas plūsmas uz detritu summa	629	t/km ² /gadā
Kopējā sistēmas plūsma	2542	t/km ² /gadā
Visas produkcijas summa	1257	t/km ² /gadā
Vidējais trofiskais līmenis nozvejās	3,30	
Bruto efektivitāte (nozveja/neto p.)	0,00032	
Aprēķinātā kopējā neto pirmprodukcija	1071	t/km ² /gadā
Kopējā pirmprodukcija/kopējā respirācija	2,20	
Neto sistēmas produkcija	584	t/km ² /gadā
Kopējā primārā produkcija/kopējā biomasā	7,26	
Kopējā biomasā/kopējā sistēmas plūsma	0	t/km ² /gadā
Kopējā biomasā (izslēdzot detritu)	147	t/km ²
Kopējā nozveja	0,34	t/km ² /gadā
Savienojamības indekss	0,25	
Sistēmas omnivora indekss	0,08	

2.6.1. tabula. Salīdzinājums starp Saukas un Vōrtsjārv ezera ekosistēmas indikatoriem.

Indikators	Sauka	Vōrtsjārv	Mērvienība
Kopējā sistēmas plūsma	2542	14841	t/km ² /gadā
Visas produkcijas summa	1257	6577	t/km ² /gadā
Aprēķinātā kopējā neto pirmprodukcija	1071	5700	t/km ² /gadā
Kopējā pirmprodukcija/kopējā respirācija	2.20	4.55	



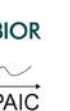
Secinājumi

1. Saukas ezerā dominē pelagiskās un bentiskās barības ķēdes – 83 % no organisko vielu produkcijas veido fitoplanktons un 45 % no tās patērē bentoss.
2. Fitoplanktons labi iekļaujas augstākajos barības tīkla līmeņos. Salīdzinoši nelielā atmirušī fitoplanktona daļa pāriet uz detritu, tādā veidā veicinot organisko vielu akumulāciju sedimentos.
3. Gliemeņu augstā biomasa un zemā ekotrofiskā efektivitāte liecina par biomasas akumulēšanos – vairāk nekā 90 % no gliemeņu produkcijas barības ķēdē netiek izmantota un uzkrājas, rezultējoties kopējās biomasas pieaugumā.
4. Vairumam funkcionālo grupu ir augstas EE vērtības ($> 0,8$), kas norāda uz efektīvu produkcijas masas pārneši uz augstākiem barības tīkla līmeņiem.
5. Saukas ezera ekosistēma nav vērtējama kā ļoti produktīva – esošā zemāko trofisko līmeņu organismu grupu produkcija (izņemot Bivalvia) nespēj uzturēt augstu zivju biomasu.
6. Izveidotais ekoloģiskais modelis norāda uz labu ezera ekosistēmas stāvokli un ezers ir vērtējams kā mezotrofs vai vāji eitrofs.
7. Izveidotais modelis ir izmantojams ekoloģisko procesu raksturošanai Saukas ezera ekosistēmā. Nākotnē, nodrošinot ilgtermiņa informāciju par hidroloģiskajām un barības tīkla izmaiņām, uz izveidotā modeļa bāzes ir iespējams izveidot dinamisku modeli, kas var prognozēt izmaiņas dažādu vides un apsaimniekošanas scenāriju ietekmē un var kalpot par komponentu ekosistēmas pieejā balstītas vides pārvaldības sistēmas izveidē.

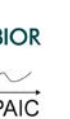


Izmantotā literatūra

- Allen, K.R. 1971. Relation between production and biomass. J. Fish. Board Can. 28: 1573-81.
- Bhele, U., Öglü, B., Feldmann, T., Bernotas, P., Agasild, H., Zingel, P., Nöges, P., Nöges, T., Cremona F. 2022. Modelling how bottom-up and top-down processes control the major functional groups of biota in a large temperate shallow lake, Inland Waters, 12:3, 368-382, DOI: 10.1080/20442041.2022.2031813.
- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997a). A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. Limnology and oceanography, 42(7), 1479-1491.
- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997b). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. Limnology and oceanography, 42(1), 1-20.
- Birzaks J. 2007. Latvijas iekšējo ūdeņu resursi un to izmantošana. Latvijas Zivsaimniecības gadagrāmata 2007. Rīga, 66-82.
- Borowiak, D., & Borowiak, M. (2016). Comparative studies of underwater light regimes in lakes of the East-Suwałki Lakeland. Limnological Review, 16(4), 173-183.
- Brey T, 2001. Population dynamics in benthic invertebrates. A virtual handbook. <http://www.thomas-brey.de/science/virtualhandbook/>
- Brey, T., Müller-Wiegmann, C., Zittier, Z., Hagen, W. 2010. Body composition in aquatic organisms - a global data bank of relationships between mass, element composition and energy content. Journal of Sea Research 64: 334-340. (doi:10.1016/j.seares.2010.05.002). Population dynamics in benthic invertebrates. A virtual handbook. Version 01.2. <http://www.thomas-brey.de/science/>
- Brey T, 2012. A multi-parameter artificial neural network model to estimate macrobenthic invertebrate productivity and production. Limnology and Oceanography Methods 10: 581-589. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.581>
- Christensen, V., Pauly, D. (Eds.), 1993, Trophic models of aquatic ecosystems, No. 26, p. 390. ICLARM Conference Proceedings.
- Christensen V., Walters C. J. 2004. Ecopath with Ecosim: Methods, capabilities and limitations. Ecological Modelling, 172(2-4), 109-139.
- Christensen V., Walters C. J., Pauly D., Forrest R. 2008. Ecopath with Ecosim version 6 User Guide, (November), 1-235.
- Cremona, F., Järvalt, A., Bhele, U. et al. 2018. Relationships between fisheries, foodweb structure, and detrital pathway in a large shallow lake. Hydrobiologia 820, 145-163. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3648-2>
- EMODnet Seabed Habitats (2016). Light (PAR) at the sea surface - Europe-wide <https://gis.ices.dk/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/875f6a42-a759-4682-ad2a-e679ff55fed4>
- Fahey, T. J., & Knapp, A. K. (Eds.). (2007). Principles and standards for measuring primary production. Oxford University Press.
- Froese, R. and D. Pauly. Editors. 2023. FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (10/2023).
- Heymans J. J., Coll M., Libralato S., Christensen V. 2012. Ecopath Theory, Modeling, and Application to Coastal Ecosystems. Treatise on Estuarine and Coastal Science (Vol. 9). Elsevier Inc.



- Heymans J. J., Coll M., Link J. S., Mackinson S., Steenbeek J., Walters C., Christensen V. 2016. Best practice in Ecopath with Ecosim food-web models for ecosystem-based management. *Ecological Modelling*, 331, 173–184.
- Kubečka J., Hohašová E., Matěna J., PETERKA J., Amarasinghe U.S., Bonar S.A., Hateley J., Hickley P., Suuronen P., Tereschenko V., Welcomme R., Winfield I.J. (2009). The true picture of a lake or reservoir fish stock: A review of needs and progress. *Fisheries Research* 96: 23-29.
- Latvijas Universitāte, 2023. Komplekss ezera hidrobioloģiskais, hidroķīmiskais un hidromorfoloģiskais monitorings, LIFE GoodWater IP, Rīga, 65 lpp.
- Link J. S. 2010. Adding rigor to ecological network models by evaluating a set of pre-balance diagnostics: A plea for PREBAL. *Ecological Modelling*, 221(12), 1580–1591.
- Palomares, M. L. D., and Pauly, D. 1989. A multiple regression model for predicting the food consumption of marine fish populations. *Aust. J. Mar. Freshwat. Res.*, 40:259-273.
- Palomares, M. L. D., and Pauly, D. 1998. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity. *Marine & Freshwater Research*, 49(5):447-453.
- Pauly, D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters and mean environmental temperature in 175 fish stocks. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* 39: 175–92.
- Posit Team. 2023. RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL <http://www.posit.co/>
- R Core Team. 2023. v4.3.0. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Wetzel R.G. 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Third. Ed. Academic Press, San Diego. 1006p.
- Wickham, H. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wickham, H. Bryan, J. 2023. readxl: Read Excel Files. R package version 1.4.2 <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>



PIELIKUMI

1. Pielikums. Modeļa ievades parametri

P1. tabula. Saukas ezera barības tīkla modeļa funkcionālās grupas un ievades parametri.

	Organismu grupa	Funkcionālā grupa	Trofiskais līmenis	Habitātes proporcija	Biomasa habitatē (t/km ²)	P/B (/gads)	Q/B (/gads)	EE	P/Q (/gads)
1	Zivis	Līdaka	3,61	1	0,25	0,60	2,03	0,95	0,30
2		Zandarts	3,72	1	0,12	0,50	2,10	0,86	0,24
3		Asaris	3,40	1	0,97	0,46	5,99	0,93	0,08
4		Līnis	2,96	1	0,02	0,37	6,30	0,94	0,06
5		Plaudis	2,69	1	1,33	0,32	5,40	0,96	0,06
6		Plicis	2,75	1	0,42	0,40	7,10	0,92	0,06
7		Rauda	2,52	1	1,62	0,47	8,60	0,99	0,05
8		Rudulis	2,64	1	0,04	0,47	8,60	0,94	0,05
9		Vīķe	3,01	1	0,22	1,03	15,70	0,96	0,07
10	Zoobentoss	Bivalvia	2,09	1	114,89	0,90	4,52	0,06	0,20
11		Gastropoda	2,00	1	0,64	1,45	7,27	0,94	0,20
12		Diptera	2,05	1	3,75	1,76	8,82	0,97	0,20
13		Crustacea	2,00	1	0,36	1,01	5,07	0,95	0,20
14		Ephemeroptera	2,00	1	0,32	3,61	18,06	0,91	0,20
15		Hirudinea	3,05	1	0,60	2,23	11,13	0,96	0,20
16		Odonata	3,12	1	0,17	1,94	9,70	0,99	0,20
17		Trichoptera	2,20	1	0,40	2,66	13,30	0,94	0,20
18	Zooplanktons	Copepoda	2,00	1	0,68	54,91	183,04	0,87	0,30
19		Cladocera	2,00	1	0,31	51,06	170,20	0,86	0,30
20		Rotifera	2,00	1	0,22	69,41	231,36	0,92	0,30
21	Fitoplanktons	Fitoplanktons	1,00	1	2,48	421,00		0,67	
22	Makrofīti	Makrofīti	1,00	0,294	60,00	1,50		0,45	
23	Detrits	Detrits	1,00	1	7,03			0,07	

P2. tabula. Saukas ezera barības tīkla modeļa funkcionālās grupas un ievades parametri.

	Funkcionālā grupa	Makšķerēšana (t/km ² /gads)
1	Līdaka	0,1390
2	Zandarts	0,0520
3	Asaris	0,0390
4	Līnis	0,0004
5	Plaudis	0,1010
6	Plicis	0,0001
7	Rauda	0,0080
8	Rudulis	0,0010



P3. tabula. Saukas ezera barības tīkla modeļa funkcionālo grupu barošanās attiecības.

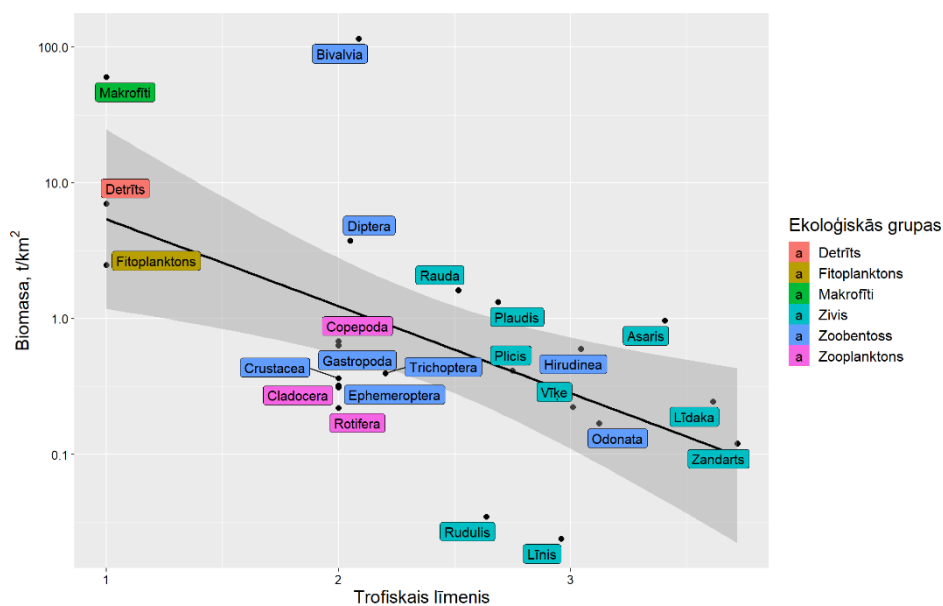
	Upuris \ Plēsējs	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Līdaka	0,000																			
2	Zandarts	0,000																			
3	Asaris	0,000		0,065																	
4	Līnis	0,016																			
5	Plaudis	0,450	0,100	0,010																	
6	Plicis	0,050	0,050	0,020																	
7	Rauda	0,483	0,500	0,065																	
8	Rudulis	0,000		0,003																	
9	Vīķe	0,000	0,350	0,023																	
10	Bivalvia				0,155	0,345	0,110	0,248	0,001							0,050					
11	Gastropoda			0,020	0,129	0,022	0,033	0,010	0,037							0,050					
12	Diptera			0,032	0,072	0,010	0,121	0,010	0,086	0,200			0,010			0,600	0,214	0,050			
13	Crustacea			0,020													0,142				
14	Ephemeroptera			0,015	0,095	0,010	0,010	0,010	0,096	0,050							0,150	0,050			
15	Hirudinea			0,190		0,000										0,010	0,064				
16	Odonata			0,020	0,082	0,021	0,010	0,001	0,010												
17	Trichoptera			0,050	0,210	0,010	0,010	0,010	0,223								0,214				
18	Copepoda			0,211	0,021	0,106	0,209	0,102	0,061	0,375	0,050		0,020			0,010	0,107	0,050			
19	Cladocera			0,257	0,043	0,106	0,210	0,102	0,061	0,375	0,010		0,020			0,280	0,107	0,050			
20	Rotifera						0,008				0,027										
21	Fitoplanktons						0,072				0,913				0,050				1,000	1,000	1,000
22	Makrofīti				0,002	0,050	0,130	0,307	0,347			0,700	0,050		0,150			0,200			
23	Detrits				0,191	0,318	0,078	0,200	0,077			0,300	0,900	1,000	0,800			0,600			



2. Pielikums. Modeļa diagnostika

Izveidotajam Saukas ezera ekosistēmas modelim pārbaudītas ekoloģiskās un termodinamikas sakarības (*PreBal* pieeja), kurām ir jāatbilst noteiktiem principiem, lai modeli uzskatītu par korektu. Attiecība starp mazākās grupas biomasu un lielākās grupas biomasu Saukas ezerā ir 3,68, kas ir zem vēlamā vērtību apgabala (5-7) (Link 2010). Taču kā tiek norādīts, šis rādītājs varētu būt mazāks par pieci relatīvi mazām ekosistēmām, pie kādām noteikti ir pieskaitāms Saukas ezers. Šajā ekosistēmas modelī ir tikai trīs trofiskie līmeņi, salīdzinājumā ar atklātas jūras vai okeāna ekosistēmu, kurā var būt pat seši trofiskie līmeņi, līdz ar to arī biomasu attiecība ir mazāka.

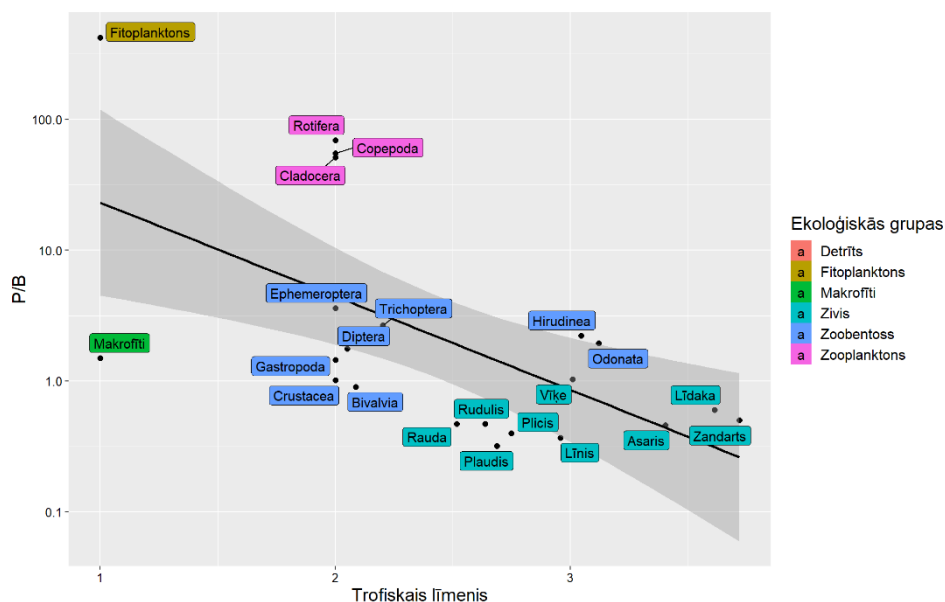
Būtiska ekoloģiskā sakarība ir biomasas samazinājums pieaugot trofiskajam līmenim. Šim samazinājumam, izteiktam kā lineārajai regresijai logaritmiskajā skalā, vajadzētu būt robežās no pieciem līdz desmit procentiem, izveidotajā modelī sasniedzot 5,87 % samazinājumu, kas uzskatāms par diapazonam atbilstošu (P1. attēls). Attēlā, kur redzams katras grupas novietojums attiecībā pret līkni, īpaša vērība jāpievērš grupām, kuras ir izteikti virs vai zem šīs līknes. Redzams, ka gliemenēm ir izteikti liela biomasu attiecībā pret tās trofisko līmeni, kas liecina, ka to kopējā biomasu sistēmā var būt pārvērtēta. Savukārt ruduļa un līņa biomasu ir ļoti zema, kas saistīts ar šo sugu nelielo īpatsvaru pētnieciskās zvejas lomās.



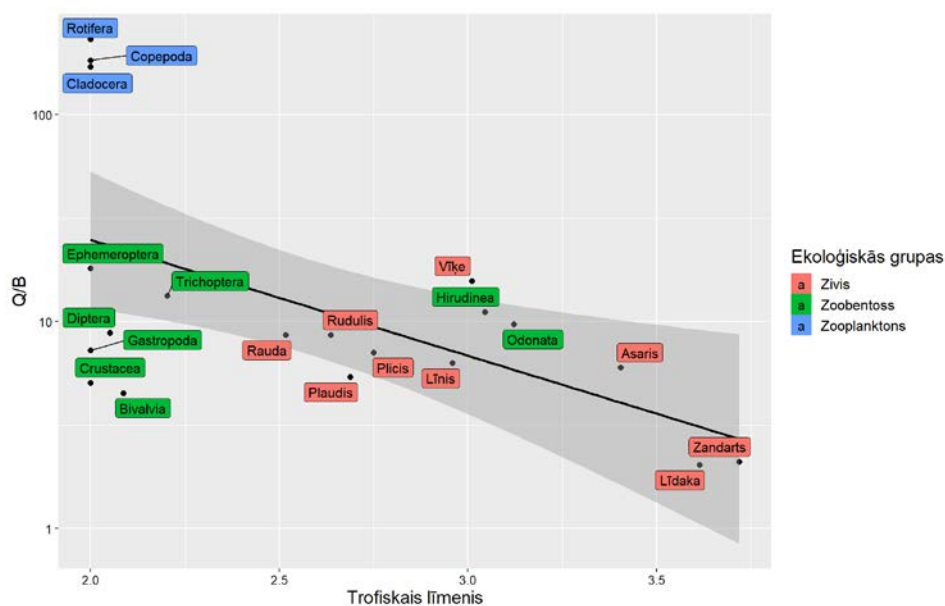
P1. attēls. Biomasas samazināšanās, pieaugot trofiskajam līmenim.

Pārbaudot visu plēsēju-upuru grupu biomasu attiecības, novērojamas dažas vērtības, kas atšķiras no ieteicamajām vērtībām (<1 un 1-2 nulles aiz komata). Gliemeņu biomasu attiecība pret to barības objektu biomasu ir krietni lielāka, kas arī liecina, ka gliemeņu biomasu ekosistēmā var būt novērtēta par augstu.

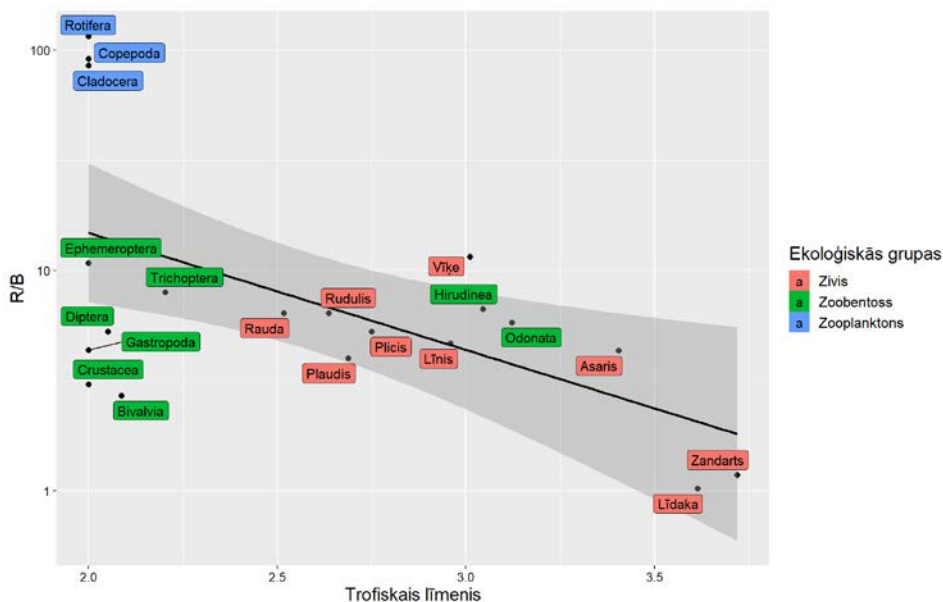
Līdzīgi kā biomasām, arī modelī izmantotajiem P/B (produkcija/biomasa) un Q/B (patēriņš/biomasa) koeficientiem, kā arī aprēķinātajai R/B (respirācija/biomasa) attiecībai ir jāsamazinās pieaugot trofiskajam līmenim (P2., P3., P4. attēls).



P2. attēls. P/B attiecības samazināšanās, pieaugot trofiskajam līmenim.



P3. attēls. Q/B attiecības samazināšanās, pieaugot trofiskajam līmenim.



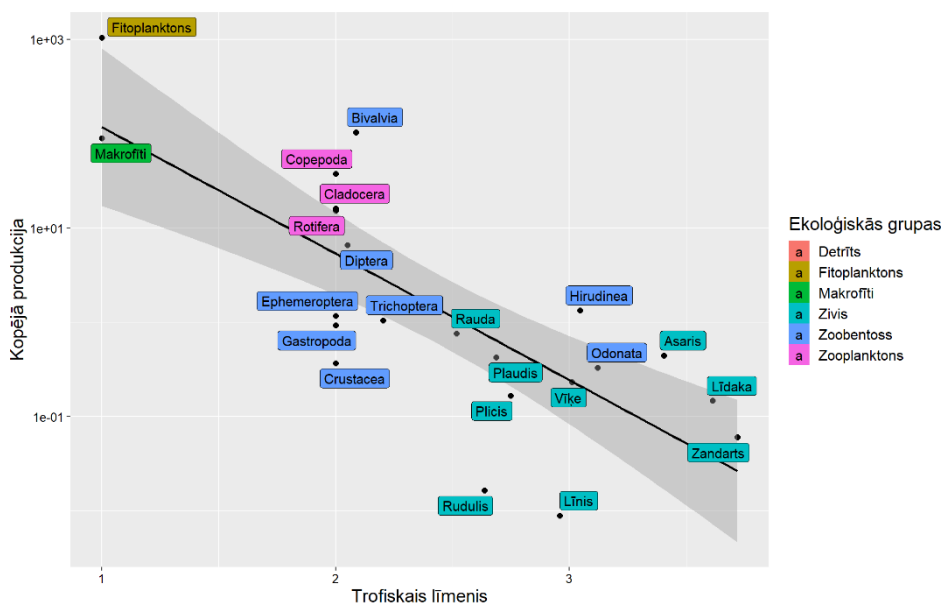
P4. attēls. R/B attiecības samazināšanās, pieaugot trofiskajam līmenim.

Kopumā visām attiecībām iezīmējas lejupejoša tendence, kas atbilst *PreBal* diagnostikas prasībām. P/B attiecības grafikā redzams, ka gandrīz visas funkcionālās grupas labi iekļaujas šajā sakarībā, virs līknes esot visām zooplanktona grupām, tā pat arī Q/B un R/B attiecību grafikos redzama izteikta zooplanktonu sugu atrašanās virs līknes, kas nozīmē, ka nozīmīga uzņemtais enerģijas daļa tiek patērēta metabolisko procesu nodrošināšanai. Pārbaudot šo koeficientu attiecības starp plēsēju un medījumu grupām, novērojams, ka visām grupām ir spēkā ieteiktais vērtību intervāls (<1), izņemot zooplanktona grupas, bet tiek minēts, ka tieši šīm grupām attiecības nav jāņem vērā kopējā modeļa darbības izvērtējumā.

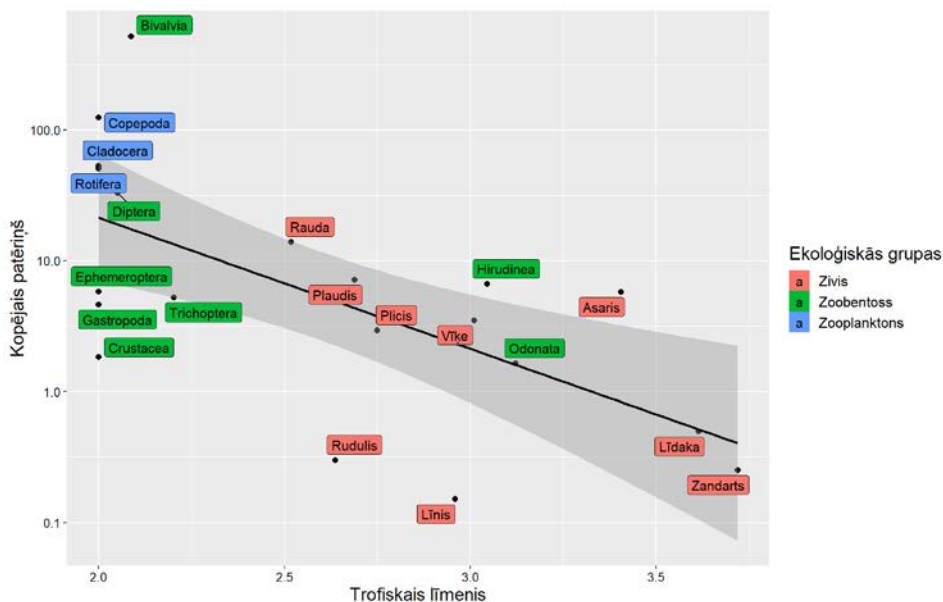
Izveidotajam *Ecopath* modelim pilnībā izpildās arī nosacījums, ka nevienai funkcionālajai grupai nevar būt augstāka P/B vērtība kā fitoplanktonam, kā arī visu grupu P/Q un P/R attiecības ir zemākas par viens.

Būtiska ekoloģiskā sakarība, kas ir jāpārbauda, ir kopējas produkcijas un patēriņa samazināšanās pieaugot trofiskajam līmenim. Attēlojot grafiski šīs sakarības (P5., P6. attēls), redzams, ka kopējās produkcijas un biomasas samazinājums atkarībā no trofiskā līmeņa ir salīdzinoši straujš, nevienai no grupām neuzrādot izlecošas vērtības, izņemot gliemenes, kuru biomasā sistēmā, iespējams, ir pārvērtēta, kā arī līnis un rudulis uzrāda zemu kopējo produktivitāti un patēriņu, jo šo sugu biomasas ir novērtētas kā salīdzinoši zemas.





P5. attēls. **Kopējās produkcijas samazināšanās, pieaugot trofiskajam līmenim.**



P6. attēls. **Kopējā patēriņa samazināšanās, pieaugot trofiskajam līmenim.**

Katra grupas patēriņš no plēsēju puses ekosistēmās nedrīkst pārsniegt šīs grupas produkciju. Šo sakarību atspoguļo grupas ekotrofiskā efektivitāte EE un tā nedrīkst būt lielāka par vienu, kas nozīmētu to, ka grupa tiek patērēta vairāk, nekā ir tās produkcija. Visām modelī esošajām grupām šī efektivitāte ir normas robežās. Kopumā izveidotais modelis atbilst PreBal modeļa validācijas principiem, bet arī tiek norādīts uz funkcionālajām grupām, kuru ievades datiem vajadzētu pievērst lielāku uzmanību un iespējams, būtu nepieciešama šo datu pārvērtēšana.