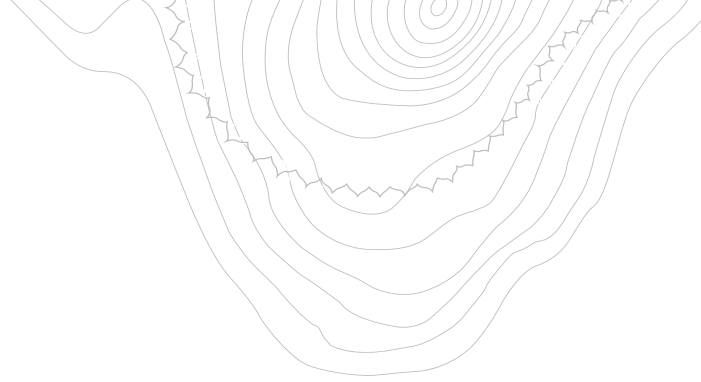


VSIA “LATVIJAS VIDES, ĢEOLOĢIJAS
UN METEOROLOĢIJAS CENTRS”

Ziņojums

**LATVIJAS JŪRAS KRASTA
LĪNIJAS ATTĀLINĀTĀ
MONITORINGA SISTĒMA
UN NOVĒRTĒJUMS**

RĪGA, 2024



Brošūra sagatavota un izdota ar Norvēģijas finanšu instrumenta 2014.–2021. gada perioda programmas “Klimata pārmaiņu mazināšana, pielāgošanās tām un vide” atbalstu projekta “Klimata pārmaiņu politikas integrācija nozaru un reģionālajā politikā (Nr. LV-CLIMATE-0001)” ietvaros.

Strādājam kopā zaļai Eiropai!

AUTORI:

Viesturs Zandersons

Valters Žeizis

Jānis Lapinskis

Andris Vīksna

ISBN: 978-9-93492-561-0



SATURS

IEVADS	5
BALTIJAS JŪRAS UN RĪGAS LĪČA KRASTA RAKSTUROJUMS	6
LĪDZŠINĒJIE PĒTĪJUMI LATVIJĀ UN PASAULĒ	8
2.1. Jūras krasta pētījumi latvijā	8
2.2. Jūras krasta ģeoloģisko procesu monitorings (1987-2009, 2023)	8
2.3. Līdzšinējie attālinātās izpētes pētījumi krasta izmaiņu raksturošanai pasaulē	10
MATERIĀLI UN METODES	13
3.1. Izmantoto datu kopu raksturojums.....	14
3.1.1. Sentinel-2 dati.....	14
3.2.2. Bezpilota lidaparātu dati.....	16
3.3.3 Komerčiālo satelītu dati.....	17
3.2. Datu pirmsapstrāde	17
3.2.1. Atmosfēras korekcija	18
3.2.2. Datu koreģistrācija	19
3.2.3. Mākoņu maskēšana	20
3.3. Ūdens līniju izdalīšana	21
3.3.1. Ūdens un sauszemes automātiska izdalīšana	21
3.3.2. Kļūdu izņemšana	23
3.3.3. Līniju vienkāršošana	24
3.3.4. Līniju vektorizācija.....	25
3.3.5. Aukstās sezonas filtrēšana	26
3.3.6. Jūras līmeņa filtrēšana.....	26
3.3.7. Manuāla kvalitātes kontrole.....	27
3.4. Krasta izmaiņu analīze	28
3.5. Ūdens līniju verifikācija	30
3.6. Nākotnes ūdens līmeņa un krasta izmaiņu prognoze	30
3.7. Mediānu krasta līnijas izveide	31
REZULTĀTI	33
4.1. Krasta erozijas analīze.....	33
4.2. Krasta erozijas analīze.....	34
4.3. Ūdens līniju verifikācija	47

4.4. Rezultātu precizitātes novērtējums	48
4.5. Nākotnes riska novērtējums.....	50
SECINĀJUMI UN APKOPOJUMS.....	52
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS.....	53

IEVADS

Jūras krasta dinamiskās izmaiņas ir problēma gandrīz visā pasaulē (Luijendijk et al., 2018). Līdzšinējā pasaules okeāna ūdens līmeņa kāpuma sekas jau ir novērojamas dažādās piekrastes teritorijās visā pasaulē. Turklāt, nākotnes klimata pārmaiņu scenāriji prognozē turpmāku pasaules okeāna līmeņa paaugstināšanos un ekstrēmu meteoroloģisko notikumu atkārtotānās biežuma pieaugumu, kas atsauksies arī uz krasta procesu, īpaši piekrastes erozijas, intensifikāciju nākotnē (Kopp et al., 2023; Vousdoukas et al., 2020)

Arī Baltijas jūrā nākotnē tiek prognozēts ievērojams okeāna ūdens līmeņa kāpums. Klimata pārmaiņu starpvaldības padome (turpmāk - IPCC) (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) savā 6. ziņojumā, kura rezultāti balstīti uz "SSP" (Shared Socioeconomic Pathways) klimata pārmaiņu scenārijiem, norāda u viennozīmīgu ūdens līmeņa kāpumu nākotnē visā Baltijas jūras reģionā. Latvijas 497 km garo piekrasti Baltijas jūrā veido smilšaina lēzenu ieloku un vāji izteiktu zemesragu mija. Latvijas piekrastes procesus tieši ietekmē smilšu sanešu materiāla pārvietošanās viļņu un ūdens līmeņa izmaiņu rezultātā, no kā veidojas erozijas-akumulācijas krasti. Ņemot vērā to, ka tieši smilšu krasti ir īpaši jutīgi pret jūras līmeņa izmaiņām (Vousdoukas et al., 2020), Latvijas piekrastē ir nepieciešams nepārtraukts krasta izmaiņu monitorings, lai spētu apzināt, kā arī nākotnē prognozēt ar erozijas procesiem saistītos riskus. Līdzšinējās pludmales izmaiņu monitoringa metodes Latvijā ir balstītas uz pludmales profilēšanu. Šādi mērījumi sniedz detalizētu izpratni par piekrastes attīstību konkrētās vietās, tomēr ir resursietilpīgs process, kas nespēj nodrošināt laikā un telpā vienmērīgi izklidētus mērījumus. Turpretim tālīzpētē balstīti risinājumi piedāvā alternatīvu datu iegūšanas mehānismu, kas, apvienojumā ar automatizētu datu apstrādi, spēj nodrošināt visaptverošu krasta dinamikas monitoringu. Šādi monitoringa dati var tikt lietoti gan patstāvīgi, gan kopā ar krasta profilēšanas mērījumiem.



1.

BALTIJAS JŪRAS UN RĪGAS LĪČA KRASTA RAKSTUROJUMS

Jūras un līča krasta kopgarums Latvijā ir 497 km – no tiem atklātās Baltijas jūras un Irbes šauruma krasts ir 253 km, Rīgas līča krasts – 234 km. Lielākā daļā piekrastes ir samērā iztaisnota un ļoti izteikti līči vai zemesragi, izņemot Kolkas ragu, nav sastopami. Holocēna laikā ir notikusi ievērojama krasta līnijas pārvietošanās un krasta reljefa pārveidošanās. Daudzviet piekrastē ir sastopamas sevišķi intensīvas eolās akumulācijas liecības – valņveida kāpas (Mietragā, Bernātos, Užavā). Citviet (Liepājā–Šķēdē, Pāvilostā–Užavā) mūsdienu krasta zemūdens nogāzē vēsturiski izveidojās sanešu deficīts un jau ļoti ilgstoši notiek pamatkrasta atkāpšanās. Litorīnas jūras stadijas laikā no jūras norobežotie jomi (sekli līči) mūsdienās ir pārtapuši par sekliem, aizaugošiem jomezeriem (Papes, Liepājas, Babītes, Engures u.c.). Pēdējo gadsimtu laikā krasta konfigurācija lielākajā daļā Latvijas ir mainījusies nebūtiski, tomēr atsevišķu cilvēka izraisītu faktoru ietekmē krasta pārveidošanās un krasta līnijas pārvietošanās ir pastiprinājusies pie ostām.

Par mūsdienu krastu veidošanās sākumu Latvijas piekrastē tiek pieņemts laiks, kad ūdenslīmenis stabilizējās pašreizējā stāvoklī – pirms aptuveni 2800 gadiem. Jūras krastam Latvijā piemīt vairākas raksturīgas īpašības: krasti galvenokārt veidoti irdenos drupiežu nogulumos (smiltīs), tie ir samērā zemi un lēzeni gan virsūdens, gan zemūdens daļā. Gandrīz visur veidojas pludmale, kuras sastāvā dominē smiltis. Krasta sistēmā līdz ar to ļoti nozīmīgus traucējumus rada ostu hidrotehniskās būves. Starp dažādiem krasta posmiem notiek intensīva sanešu apmaiņa, kuras noteicošais krasta veidotājspēks ir vēja viļņi. Dažādo krastu tipu miju un ainavas daudzveidību būtiski ir ietekmējusi Litorīnas jūras laikā veidojušos iežu ģeoloģiskā uzbūve, krasta līnijas orientācija attiecībā pret valdošajiem dienvidrietumu vējiem un antropogēnie faktori.

Līdzšinējā krasta monitoringa pētījumi (skat nākamo nodaļu) norāda, ka Latvijā izplatīti ir gan ļoti lēzeni krasti, kuros ilgstoši notikusi sanešu uzkrāšanās (aptuveni 140 km kopgarumā), gan izteiktas jūras erozijas posmi, kuros sastopami dažāda augstuma un dažādas ģeoloģiskās uzbūves stāvkrasti (kopumā aptuveni 150 km). Pārējos krasta iecirkņos (aptuveni 200 km) apstākļi mūsdienās ir relatīvi stabili – tie pieaug vai atkāpjas ļoti lēni.

Krasta nogāze pārsvarā izveidojusies pleistocēna un holocēna nogulumos. Tikai atsevišķos īsos iecirkņos krasta nogāzes daļās atsedzas devona nogulumieži. Krasta reljefa augstums virs jūras līmeņa parasti nepārsniedz 5 m un tikai stāvkrastu izplatības iecirkņos var sasniegt 15–20 m. Aptuveni 130 km kopgarumā Baltijas jūras un Rīgas līča piekrastē sastopams no pludmales pārpūsto smilšu primārās akumulācijas valnis – priekškāpa vai to josla, kuras relatīvais augstums ir 2–7 m. Priekškāpu klātbūtni krasta iecirknī diezgan droši var uzskatīt par sanešu akumulācijas pārsvara indikatoru.

Lielākajā daļā Latvijas piekrastes smalkgraudainie saneši ir sastopami tikai tās augšējā daļā. Irbes jūras šaurumā un Rīgas līča dienvidu daļā smalkgraudainie saneši sastopami visā krasta zonas platumā, kā arī dziļāk par mūsdienu krasta zonas robežu. Zemūdens nogāzes augšējā daļā līdz 4 m dziļumam parasti sastopami krasta līnijai paralēli smilts vaļņi.

Vislielākā krasta reljefa mainība un dinamisms ir raksturīgs krasta iecirkņiem atklātas Baltijas jūras pusē, ko nosaka biežāk sastopamā augstas intensitātes viļņošānās un mūsu reģionam raksturīgā vētru īpatnība, kuru laikā valda rietumu vēji. Ar mainības straujumu īpaši izceļas tie krasta iecirkņi, kuros krasta procesu līdzsvars ir traucēts ostu būvju ietekmē un apsaimniekošanas prakšu rezultātā. Krasta erozija ir aktuāla arī tāpēc, ka priekškāpu josla ir īpaši pievilcīgs tūrisma un rekreācijas objekts. Augstas atpūtnieku koncentrācijas vietās tiek traucēta krasta zonai raksturīgās veģetācijas veidošanās, kas var veicināt kāpu degradāciju.

2.

LĪDZŠINĒJIE PĒTĪJUMI LATVIJĀ UN PASAULĒ

2.1. Jūras krasta pētījumi latvijā

Pirmais, kas pievērsās Baltijas jūras piekrastes pētījumiem bija Konstantīns Grēvinks (Grewingk, 1861). Sistemātiska Baltijas jūras ģeoloģijas izpēte tomēr ir sākta tikai pēc 1870. gada.

Pirmās Latvijas brīvvalsts laikā nozīmīgu pienesumu devuši Latvijas Universitātes pasniedzēji Marija Galeniece, Pauls Galeniēks, Pēteris Stakle un Rūdolfs Knaps. P. Stakle aprakstīja sanešu kustību un krasta izmaiņas Latvijas ostu rajonos (Stakle, 1936). R. Knapa un P. Reveļa pētījumi aptvēra sanešu materiāla kustību viasā Latvijas krasta zonā (Knaps, 1938; Revelis, 1938).

Padomju okupācijas perioda pētnieki, kuru darba panākumi ir vērtējami kā ļoti nozīmīgi, bija Viktors Ulsts, Eduards Grīnbergs un Rūdolfs Knaps. E. Grīnberga sastādītās paleoģeogrāfiskās shēmas un pētījumi ir pamats detālai izpratnei jautājumos par sanešu deficīta un akumulācijas zonām (Grīnbergs, 1957). V. Ulsts savos pētījumos pievērsās ļoti plašam ar jūras krastiem saistītu jautājumu lokam (Ulsts, 1961). V. Ulsta monogrāfija „Baltijas jūras Latvijas krasta zona” (Ulsts, 1998) ir viens no nozares plašākajiem apkopojošajiem darbiem. Baltijas jūras agrāko stadiju krasta formu un sanešu pārvietošanās likumsakarību izpēti ir veicis Ints Veinbergs (Veinbergs un Danilans, 1992).

Kopš divdesmitā gadsimta astoņdesmitajiem gadiem lielu ieguldījumu jūras krastu izpētē ir devis Guntis Eberhards. Sākot ar 1987. gadu notiek Gunta Eberharda un Baibas Saltupes aizsāktais jūras krastu ģeoloģisko procesu monitorings. 2003. gadā publicēta G. Eberharda monogrāfija „Latvijas jūras krasti” (Eberhards, 2003).

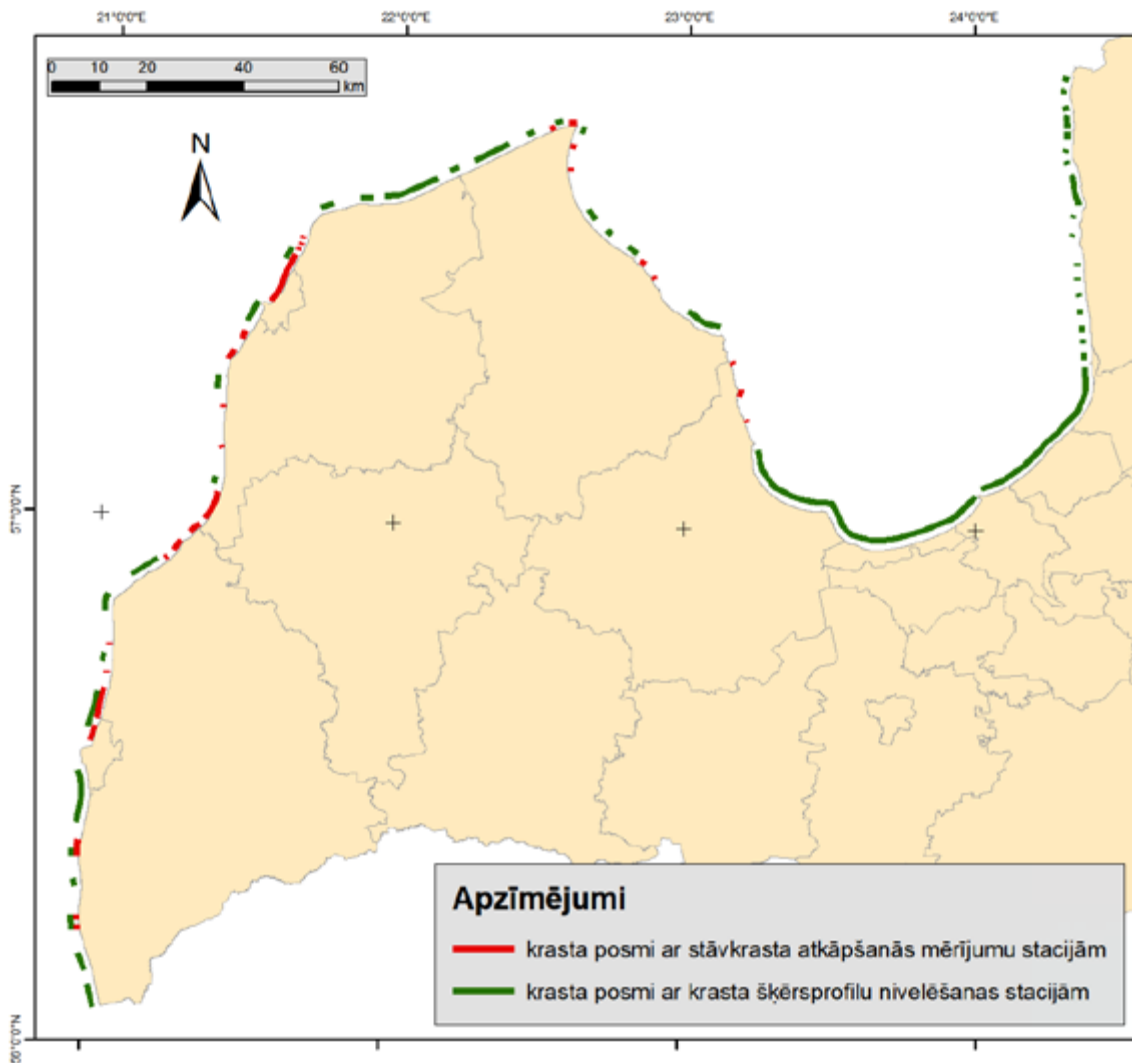
Valsts Pētījumu Programmas “KALME” ietvaros 2009. gadā tika sagatavota krasta erozijas prognoze 15 un 50 gadu periodam. Kopš 2009. gada LU Jūras krastu laboratorijā tiek veikti monitoringa tipa pētījumi par sanešu apjoma izmaiņām krasta nogāzes virsūdens daļā, esošo krasta preterozijas risinājumu efektivitāti, rekreācijas slodzes iespējamo ietekmi, kā arī jaunu erozijas riska apsaimniekošanas metožu piemērotību. Latvijas Universitātes pētnieku grupa Jāņa Lapinska vadībā 2015. gadā ir sagatavojusi “Vadlīnijas jūras krasta erozijas seku mazināšanai” (Lapinskis & Grīne, 2014).

2.2. Jūras krasta ģeoloģisko procesu monitorings (1987-2009, 2023)

G. Eberharda izstrādātā jūras krasta ģeoloģisko procesu monitoringa metodika ir izmantota datu par krasta reljefa izmaiņām ieguvei līdz 2023. gadam. Monitoringa sistēmas uzturēšanai laikā no 1992. līdz 1996. gadam tika izveidots visu Latvijas piekrasti aptverošs stacionāru posteņu tīkls (1. attēls), kas turpmākajos gados

tika papildināts, kā arī tika palielināts tā blīvums. Monitoringa sistēma ietver divu veidu stacionāru grupas, kurās datu ieguve notiek ar atšķirīgām metodēm. Dati ir pieejami Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un zemes zinātņu fakultātes Latvijas jūras krastu ģeoloģisko procesu monitoringa (LU ĢZZF LJKĢPM) datu bāzē. Pēc 2009. gada, kad finansējums monitoringa sistēmas uzturēšanai vairs netika piešķirts, **datu ieguves apjoms ir būtiski samazināts.**

Datu ieguve notiek īpaši ierīkotās stacijās, kuras sastāv no mērījumu posteņu grupām. Mērījumu posteņos datus iegūst veicot tehnisko nivelēšanu vai mehāniski mērot attālumu starp raksturīgiem krasta reljefa elementiem. Katra mērījumu posteņu grupa ir izvietota atbilstoši kopējai krasta sistēmas specifikai tā, lai būtu iespējams iegūt informāciju par katru sanešu bilances ziņā būtiski atšķirīgu apakšsistēmu (iecirtni). Kopējais mērījumu posteņu skaits monitoringa sistēmā sasniedz aptuveni 400 nivelēšanas posteņu un aptuveni 2000 vienkāršoto mehānisko mērījumu posteņu. Par mērījumu posteņu atbalsta punktiem ar zināmu absolūto augstumu tiek izmantoti gruntsreperi, māju pamati, kā arī īpaši ierīkoti pagaidu reperi – metāla stieņi, veci koki, laukakmeņi u.c. Reperi atrodas tālāk (augstāk) par maksimālo vētrā iespējamo plūdūdeņu līmeni un ir iespēju robežās pasargāti no eolās apbēšanas, vandālisma un privātīpašnieku neizpratnes. Profilu garums atkarībā no konkrētā krasta posma īpatnībām atrodas robežās no 50 līdz 200 m. Datu ieguve posteņos tika veikta vienu reizi gadā, parasti vasarā vai rudenī. Lai iegūtu pietiekami precīzu pludmales un eolā reljefa šķērsprofilu, latus nolasījumi nivelējot tiek veikti visos mikroreljefa liekuma punktos, vai arī ne retāk kā ik pēc 10 metriem. Mērījumi tiek veikti tikai līdz augstuma „0” atzīmei Latvijas augstumu sistēmā (LAS), bet krasta zemūdens nogāzē mērījumi netiek veikti.



1. attēls. Jūras krasta ģeoloģisko procesu monitoringa staciju izvietojums.

Tehnisko nivelēšanu uz stāvkrasta nogāzes daudzviet nav iespējams veikt, tāpēc nepieciešama atsevišķa stāvkrasta atkāpšanās pētīšanas metode. Stāvkrasta augšmalas atkāpšanās stacionārie pētījumi izveidoti, daļēji pamatojoties uz Lielbritānijas upju krastu erozijas pētījumos izmantoto metodiku (Hooke, 1979). 13.06.2024 13:35:00 Metodes pamatā ir attāluma noteikšana starp kraujas augšmalu un dabā iezīmētu atbalsta punktu (reperi). Attālums tiek mērīts ar mērlenti, lāzertālmēru vai citu ierīci ar precizitāti dabā 0,1 m. Stacionāri ir izvietoti visos piekrastes posmos, kuros izplatīti stāvkrasti. Salīdzinot kārtējo mērījumu rezultātus, tiek noteikts noskalotās pamatkrasta joslas platums, noskalotā materiāla apjoms un noskalošanas intensitātes garkrasta sadalījums. Bezvētru periodā tiek noteikta nogāžu procesu ietekme uz stāvkrasta noārdīšanos.

2.3. Līdzšinējie attālinātās izpētes pētījumi krasta izmaiņu raksturošanai pasaulē

Pēdējo gadu laikā pasaulē ir paralēli attīstītas vairākas satelītu krasta izmaiņu pētījumu metodes (Erdem et al., 2021). Galvenās atšķirības starp metodēm ir izmantotās satelītu datu kopas, kā arī mērinstrumentu un datu apstrādes veidi.

Zemes virsmas izmaiņu pētījumos, kāds, piemēram, ir krasta izmaiņu monitorings, bieži izmanto gan **aktīvos radara sensorus**, gan **optiskos mērinstrumentus**.

Krasta erozijas pētījumi ar **aktīvo radara sensoru palīdzību** balstās jūras un zemes atstarojumu izdalīšanā, ņemot vērā raidītā un atstarotā elektromagnētiskā signāla īpašības. Satelīta radara mērinstrumenti, kā, piemēram radars uz Sentinel-1 satelīta, raida elektromagnētisko signālu Zemes virzienā, kurš, atstarojoties pret Zemes virsmu tiek saņemts atpakaļ radara uztvērējā. Ņemot vērā signāla fāzes, amplitūdas vai polaritātes izmaiņas, iespējams noteikt, vai atstarojums noticis no sauszemes, ūdens, vai jebkura cita objekta uz Zemes virsmas. Krasta erozijas pētījumi tiek īstenoti interpretējot tieši signāla amplitūdas un polaritātes izmaiņas (Modava et al., 2019; Liu et al., 2017; Nunziata et al., 2016; Buono et al., 2014). Ņemot vērā to, ka radara misijas galvenokārt izmanto viļņa garumus kuri atbilst mikroviļņiem, galvenā radara priekšrocība ir spēja uztvert izmaiņas mākoņainos laikapstākļos, jo viļņiem ar šādu garumu netraucē ūdens tvaiks. Tomēr, kamēr radars ir potenciāli perspektīvs datu avots, tā interpretācija krasta izmaiņu kontekstā ir sarežģīta, ņemot vērā atstarojumu kļūdas, kuras var izraisīt seklūdens apstākļi piekrastē, viļņu putas vai pludmales dinamiskā vide (Ouyang et al., 2010). Ņemot vērā šos apsvērumus, šajā projektā radara satelītu misiju dati netika izmantoti.

Optiskās satelītu misijas krasta erozijas pētījumos tiek izmantotas, lai noteiktu atšķirības, kādas Zemes virsmai raksturīgas redzamajā vai tam pietuvinātajā elektromagnētiskajā spektrā. Optiskie sensori nav aktīvi – tie neraida signālu, tikai uztver Saules gaismas atstarojumus no Zemes virsmas. Līdz ar to optiskie satelīti visbiežāk atrodas saules sinhronajās orbītās, kuras ir sinhronizētas ar Zemes rotācijas ātrumu – lai tie vienmēr veiktu mērījumus brīžos, kad attiecīgajā laikā uz Zemes ir diena. Piekrastes izmaiņu pētījumi ar optiskajiem sensoriem balstās spektrālo īpašību atšķirībā, kāda novērojama gaismai atstarojoties no sauszemes un ūdens. Tās ļauj veikt augstas ticamības klasifikāciju satelīta attēliem, precīzi izdalot piekrasti un jūru. Līdzšinējās metodes galvenokārt atšķiras izmantotajās satelītu misijās, kā arī attēlu klasifikācijas algoritmos. Ar dažādām metodēm un datu kopām iespējams izdalīt arī dažādus **krasta izmaiņu indikatorus**, piemēram, ūdens un sauszemes robežu, vienmērīgas veģetācijas un smilšu robežu, garkrasta kāpas, pamatkrasta u.c. pludmales ģeomorfoloģiskās robežas (McAllister et al., 2022).

Visbiežākais krasta izmaiņu indikators kāds tiek noteikts ar optisko satelītu palīdzību ir ūdens-zemes robeža jeb ūdens līnija, angļiski arī dēvēts par *instantaneous waterline*. Visbiežāk ūdens līnijas noteikšanai tiek izmantoti brīvpieejas satelītmisiju Landsat un Sentinel 2 dati (European Space Agency, 2023; NASA, 2024). Tās noteikšanai bieži tiek izmantoti spektrālie indeksi, piemēram, normalizētās starpības ūdens indekss (NDWI), Otsu sliekšņa robežas un Kanija malas noteikšanas algoritmi (*canny edge-detect*) (Luijendijk et al., 2018; Gao, 1996; Canny, 1986; Otsu, 1979). Globālā mērogā uz šo metožu pamatu ir izveidoti vairāki algoritmi, kas ir ļāvuši veikt ūdens līnijas noteikšanu dažādās pasaules vietās, piemēram, Francijā, Austrālijā un Amerikas Savienotajās Valstīs (Konstantinou et al., 2023; Vos et al., 2019). Ūdens līnijas noteikšanai mūsdienās tiek izmantoti arī dažādi mašīnmācīšanās algoritmi, piemēram, gadījuma mežu (*random forest*) un dziļo neironu tīklu klasifikācija (Erdem et al., 2021; Manaf

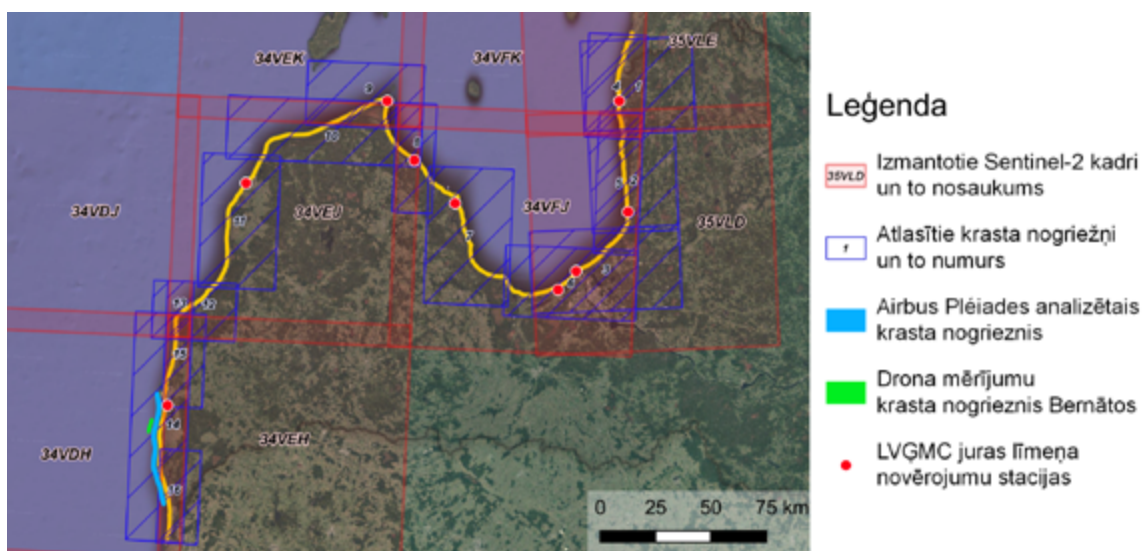
et al., 2018). Jāatzīmē, ka, neskatoties uz metožu sarežģītību, mašīnmācīšanās algoritmu rezultātiem ūdens līniju klasifikācijā nav viennozīmīgi labāki rezultāti kā klasiskajām attēlu apstrādes un spektrālo indeksu metodēm. Tieši otrādi - ņemot vērā klasisko metožu salīdzinoši vienkāršo interpretāciju, tās ir efektīvāk un vienkāršāk pielietojamas (Vitousek et al., 2023; McAllister et al., 2022).

Jāatzīmē, ka liela daļa pētījumu pasaulē līdz šim ir koncentrējušies vai nu uz lokālu, nelielu pludmaļu (<20 km garumā) monitoringu, vai arī globālu, kontinentu mēroga analīzi (>100 km garumā). McAllister et al. (2022) savā apskatā uzsver nepieciešamību jebkuru attāli noteiktu **krasta izmaiņu indikatoru** pielāgot lokālām pludmales ģeoloģiskajām un ģeomorfoloģiskajām īpašībām. Latvijas gadījumā tas ir īpaši svarīgi – ņemot vērā Latvijas pludmales dinamisko vidi, nepieciešams padziļināti analizēt dažādu metožu pielietojumu, kā arī izvērtēt katras metodes priekšrocības un trūkumus katrā piekrastes posmā.

3.

MATERIĀLI UN METODES

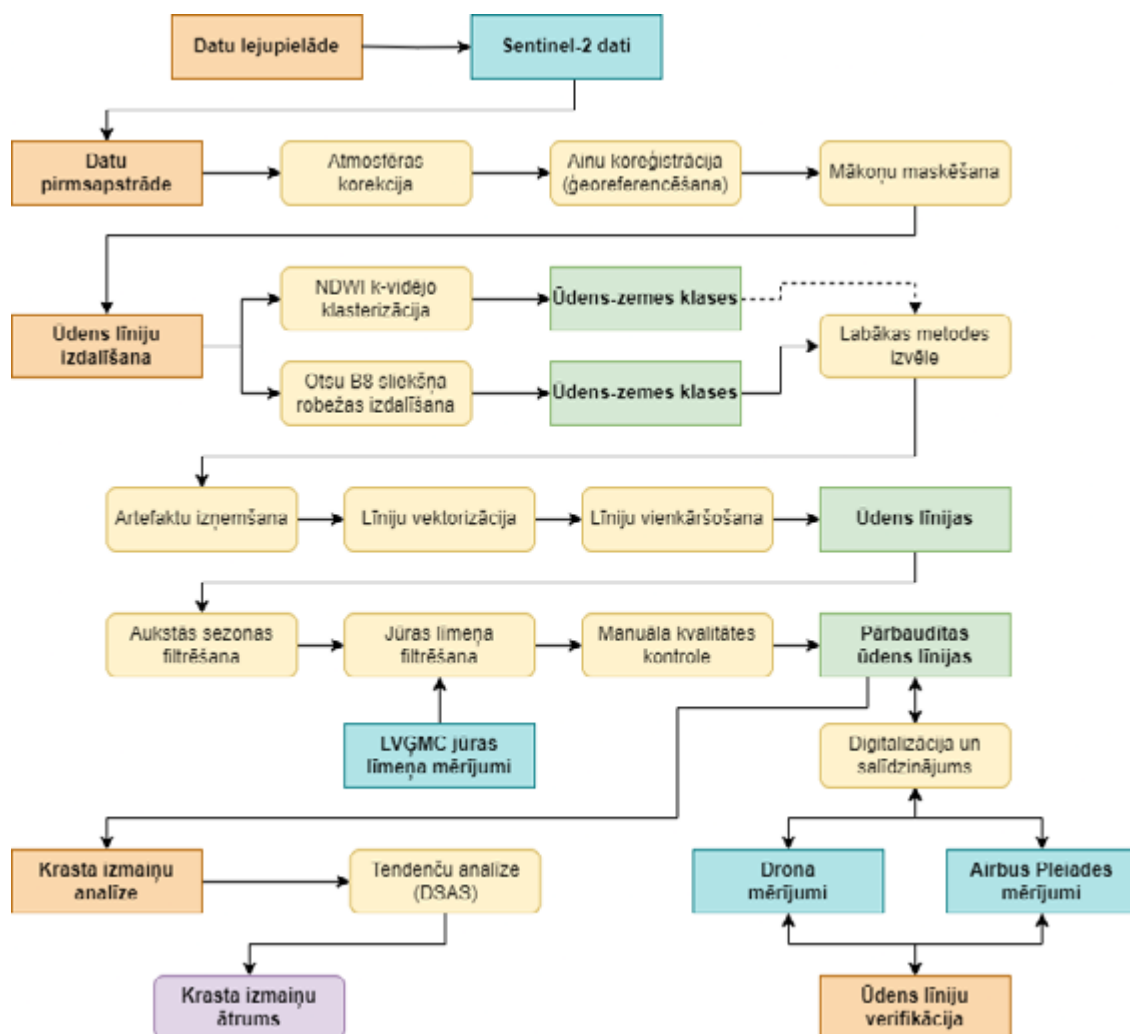
Pamatojoties uz iepriekšējiem pētījumiem un metodikas apskatu, Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centra (LVĢMC) eksperti veica Latvijas piekrastes izmaiņu monitoringu un analīzi, izmantojot vairākus attālinātās izpētes risinājumus. Galvenie kritēriji tālizpētes datu kopu izvēlē bija to juridiskā un praktiskā pieejamība, kā arī tehniskais raksturojums, t.i., mērījumu veids, biežums un datu kopas raksturlielumi. Kā galvenā datu kopa izvēlēta Eiropas Kosmosa aģentūras tālizpētes programmas Copernicus Sentinel-2 datu kopa (European Space Agency, 2023). Projekta rezultāti ārēji aprobēti ar divām citām datu kopām - *in situ* drona attālās izpētes mērījumiem Latvijas piekrastē Bernātu pilotpoligonā un Airbus Pléiades augstas izšķirtspējas satelītu tālizpētes datiem Dienvidlatvijas teritorijā (Airbus, 2024). Ūdens līniju novērtējumā izmantoti arī LVĢMC jūras līmeņa novērojumi 9 piekrastes novērojumu stacijās (2. attēls).



2. attēls. Pētījumā izmantoto datu kopu ģeotelpiskais pārklājums

Pētījumā iegūto un izmantoto datu kopu apstrādes shēma redzama 3. attēlā. Kopumā datu apstrādes ķēdi var dalīt piecās lielās, secīgās virsgrupās - **datu lejupielādē, datu pirmsapstrādē, ūdens līniju izdalīšanā, ūdens līniju verificācijā un krasta izmaiņu analīzē.**

Atsevišķi izdalāmi arī posmi, kas secīgi attiecas uz datu attēlošanu un nākotnes prognozēm - **vidējās krasta līnijas aprēķins un nākotnes krasta līnijas izmaiņu prognozes.**

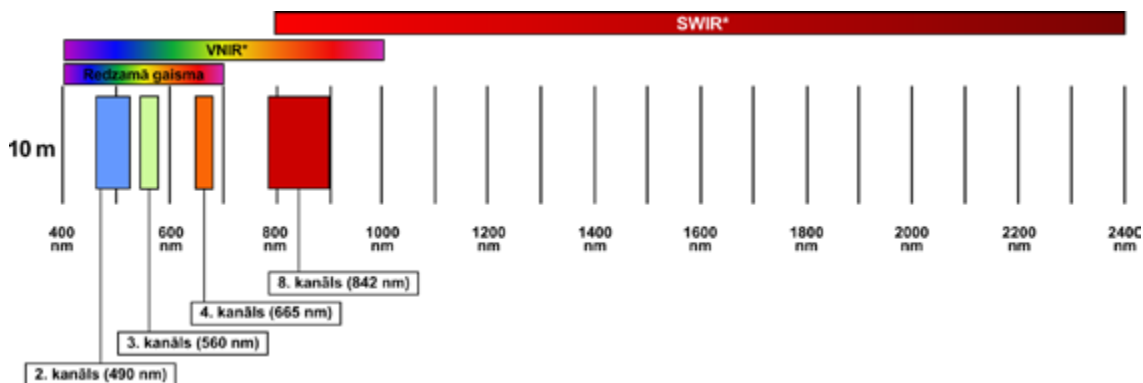


3. attēls. Pētījuma datu apstrādes ķēde. Zilie taisnstūri norāda ievaddatus, dzeltenie – pielietotās apstrādes metodes, oranžās – procesu grupas, zaļās – starprezultātus un violetais – galvenos rezultātus

3.1. Izmantoto datu kopu raksturojums

3.1.1. SENTINEL-2 DATI

Sentinel-2 ir Eiropas kosmosa aģentūras programmas Zemes novērošanas programmas *Copernicus* izveidota satelītmisija. Sentinel-2 misijā iekļauti divi satelīti, kuri Zemi apriņķo Saulei sinhronizētā orbītā. Mērījumi tiek veikti ar multispektrāla sensoru (MSI) palīdzību ar 10-60 m pikseļa izšķirspēju 290 kilometru platā teritorijā, katrā Zemes punktā atgriežoties vismaz reizi piecās dienās. MSI mēra atstaroto gaismu 13 spektrālajos kanālos (joslās), kuri ir nedaudz atšķirīgi abiem Sentinel-2 satelītiem (skat 4. attēlu).



4. attēls. Sentinel-2 datu radiometriskā izšķirtspēja 10x10 m pikseļa izmēram. VNIR – redzamās gaismas un tuvais infrasarkanais spektrs, SWIR – īsviļņu infrasarkanais spektrs (tulkots pēc European Space Agency, 2023)

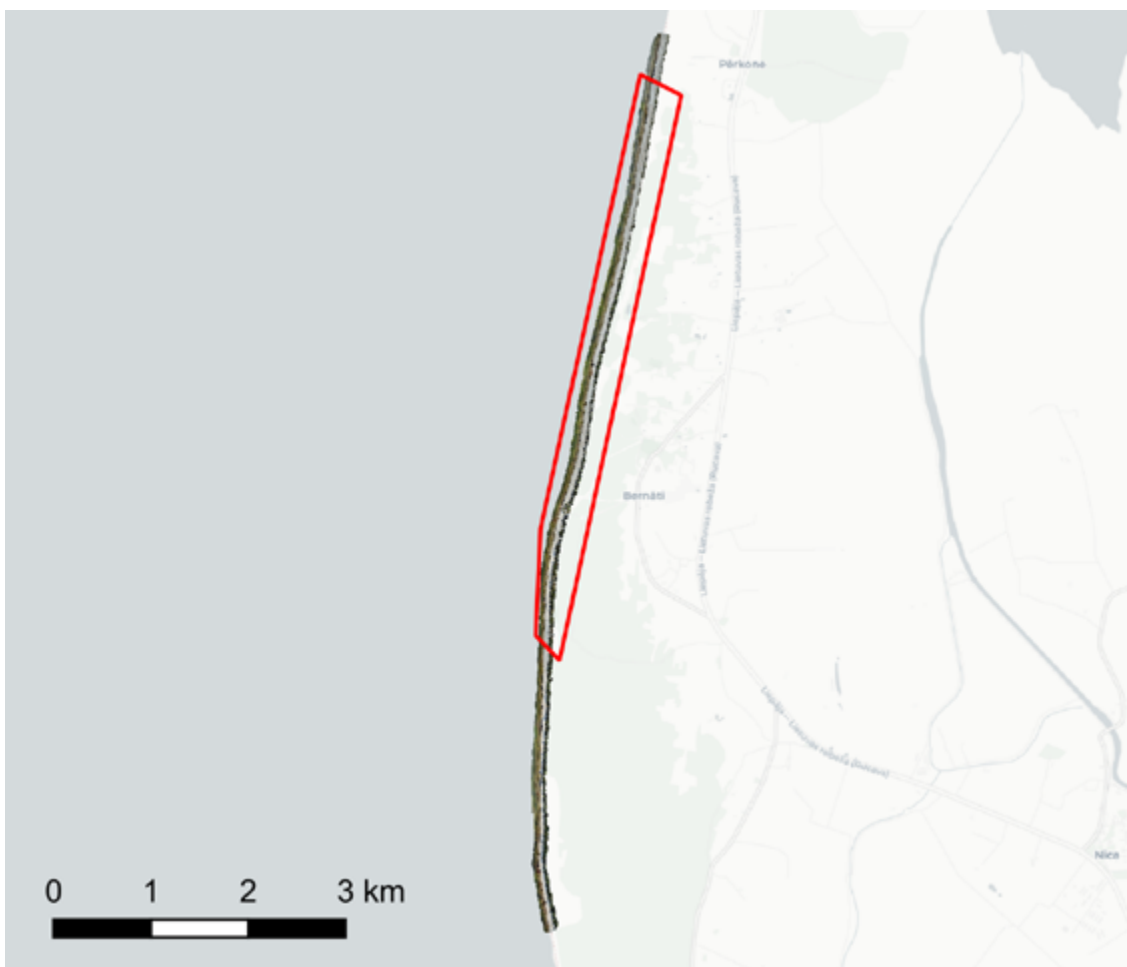
Sentinel-2 dati ir pieejami vairākos datu apstrādes līmeņos. Sākotnējais L0 līmenis iekļauj mērījumu veikšanu, pirmreizējo kvalitātes kontroli un kopskata bildes izveidi. Nākamajā solī – L1(A-C) – sākotnējie L0 dati tiek pārveidoti ar vairākām attēlu apstrādes metodēm, aizpildot izlaistos pikseļus, veicot radiometriskās, attēlu ģeometriskās un ģeotelpiskās piesaistes korekcijas. Pēdējais – L2A līmenis – nodrošina atmosfēras radītās ietekmes korekciju uz Sentinel-2 datiem. Pāreja uz L2A līmeni līdz ar to ļauj noņemt aerosolu klātbūtnes efektu atmosfērā, atrast pikseļus, kuri atbilst sniegam un/vai mākoņiem, kā arī veidot augstāka līmeņa pēcapstrādes produktus (European Space Agency, 2023).

Sentinel-2 dati publikai brīvi pieejami Copernicus “Data Space” vidē (Copernicus, 2023). Copernicus piedāvā gan interaktīvu vidi datu lejupielādei, gan piekļuves programmsaskarni (API) datu lejupielādei. Mērījumi Copernicus sistēmā atrodami pēc satelīta Nr. (Sentinel-2A vai 2B), attēla uzņēmuma datuma, kā arī atbilstošā uzņēmuma poligona numura (skat. 2. attēlsa sarkanos taisnstūrus).

Šajā aktivitātē kā galvenais izejas datu avots izmantoti Sentinel-2 L1C līmeņa dati. Copernicus nodrošinātais L2A līmenis var datus radīt kļūdas, īpaši savstarpēji salīdzinot dažādus satelītuzņēmumus (Viaña-Borja et al., 2023). Līdz ar to pieņemts lēmums atmosfēras korekciju veikt pašiem. Sentinel-2 dati lejupielādēti 9 pārklājuma poligonos, kuri savā ietvarā aptver Latvijas piekrasti, lejupielādējot visus pieejamos mērījumu datus no 2015. gada līdz mūsdienām. Aktivitātes ietvaros izveidota gan automatiska sistēma visa arhīva vēsturisko datu lejupielādei, gan operatīva sistēma, kas reizi nedēļā pārbauda Copernicus arhīvu un lejupielādē jaunākos mērījumus. Visi lejupielādētie satelītdati uzglabāti LVGMC izveidotā Oracle datu bāzē, saglabājot arī metadatus par mērījumiem – faila nosaukumu, mērījuma datumu un laiku, poligona numuru, mākoņu daudzuma procentu un unikālā MD5 identifikatora numuru. Lai izvairītos no failu sistēmas kļūdām lejupielādes laikā, iegūto satelītdatu autentiskums tika otrreizēji pārbaudīts, salīdzinot katra mērījuma unikālo MD5 identifikatoru ar Copernicus metadatos pieejamo, dzēšot lejupielādētos datus, ja identifikators nesakrīt. Kopā, laika posmā no 2015. līdz 2023. gadam (ieskaitot), lejupielādētas vairāk nekā 14000 satelītainas, kuru kopējais apjoms pārsniedz 10 TB.

3.2.2. BEZPILOTA LIDAPARĀTU DATI

Lai iegūtu augstas izšķirtspējas datus, Sentinel-2 datu atvasināto krasta līniju pārbaudes nolūkos, trīs atsevišķus gadus, Bernātu apkārtnē veikta drona fotogrammetriskie un lāzerskenēšanas (LIDAR) mērījumi (skat. 5. attēlu un zaļo krasta posmu 2. attēlā).



5. attēls. Bernātu pilotpoligona (sarkana kontūra) un 2021. gada bezpilota lidaparāta mērījumu dati Latvijas piekrastē.

Bezpilota lidaparāta mērījumi veikti trīs vasaras pēc kārtas - 2021. gada 26. jūlijā, 2022. gada 12. augustā un 2023. gada 14. jūlijā. Pārlidojumi veikti vasaras laikā, kad Saules spīdēšanas leņķis neradīja koku ēnas, kuras kristu pāri ūdens-sauszemes robežai, un labos laikapstākļos, lai dati būtu salīdzināmi ar nesenākajiem Sentinel-2 pārlidojumiem tuvāko dienu laikā. Pārlidojums veikts 500 metrus sauszemes virzienā un 100 metrus jūras virzienā no ūdens-sauszemes robežas. Mērījumi veikti ar DJI Matrice 300 RTK drona palīdzību, veicot lāzerskenēšanu ar Zenmuse L1 sensoru. Mērījumi ģeotelpiski piesaistīti ar vairākiem kontrolpunktiem uz Zemes, iegūstot aptuveno horizontālo izšķirtspēju ± 5 cm robežās. Iegūtie mērījumu dati apstrādāti ar Pix4D programmatūru, iegūstot trīs krāsu (*Red-Green-Blue*) kompozītattēlu kopā ar piekrastes reljefa modeli.

3.3.3 KOMERCIĀLO SATELĪTU DATI

Lai iegūtu plašāku rezultātu precizitātes novērtējumu, aktivitātes ietvaros tika izmantoti augstas izšķirtspējas satelītdati no komerciālajām Airbus Pléiades satelīta misijām. Airbus Pléiades ir divu satelītu misija, kas veic mērījumus visapkārt zemeslodei, ar iespēju veikt atkārtotus satlītuzņēmumus reizi dienā. Pléiades misija veic uzņēmumus ar 50 cm izšķirtspēju panhromatiskajā (PAN) kanālā un 2 m izšķirtspēju multispektrālajos kanālos (Airbus, 2024).

Airbus Pléiades dati aktivitātes vajadzībām iegūti no SentinelHub platformas. Ņemot vērā datu izmaksas, iegūti rezultāti par vienu reprezentatīvu ainu 2021. gada 9 jūnijā dienvidlatvijā, Baltijas jūras krasta posmā no Liepājas dienvidu robežas līdz Lietuvai (6. attēls). Datu pēcapstrāde veikta QGIS un GDAL programmatūrā, veicot multispektrālo kanālu izšķirtspējas uzlabošanu ar rīku *pansharpen*, kā arī uzlabotu datu ģeotelpisko piesaisti ar kontroles punktu metodi.



6. attēls Bernātu pilotpoligons (sarkans) un Airbus Pléiades mērījumi Baltijas jūras piekrastē

3.2. Datu pirmsapstrāde

Sentinel-2 datu pirmsapstrāde iekļāva trīs būtiskus posmus – atmosfēras korekciju, datu uzlabotu ģeoreferencēšanu jeb koreģistrāciju un mākoņu maskēšanu. Šie posmi secīgi aprakstīti sekojošajā nodaļā.

3.2.1. ATMOSFĒRAS KOREKCIJA

Lai nodrošinātu satelītdatau viendabīgumu pēc atmosfēras korekcijas procesa, aktivitātes ietvaros nolemts veikt piezemes līmeņa atmosfēras korekciju. Pēc padziļinātas izpētes no dažādiem pieejamajiem atmosfēras korekcijas algoritmiem L1C Sentinel-2 datu tipa apstrādei izvēlēts izmantot "Acolite" procesoru (Vanhellemont & Ruddick, 2018). "Acolite" procesors izstrādāts speciāli jūras attālināto novērojumu korigēšanai balstoties uz *dark spectrum mapping* tehniku, kas veic atmosfēras korekciju, salīdzinot krāsu katra attēla tumšākajam pikselim. Ņemot vērā, ka pētījumā analizēti piekrastes dati, šī izvēlēta kā optimālā metode datu apstrādei.

Aktivitātes ietvaros individuāli apstrādāta katrs lejupielādētais satelītuzņēmums. Apstrāde veikta ar programmā ieteiktajiem noklusējuma atmosfēras korekcijas parametriem. Ar šādas metodikas palīdzību panākta viendabība datu pirmsapstrādes procesā, lai atmosfēras traucējumu korigēšana neietekmētu krasta līnijas noteikšanas algoritmu darbību un rezultātus. Lai turpmākajā datu apstrādē samazinātu datu aprēķina apjomu, atmosfēras korekcijas solī veikta arī oriģinālo 9 Sentinel-2 uzmērījuma poligonu sagriešana 16 mazākos apakšpoligonos (zilie poligoni 2. attēlsā). Turpmākā Sentinel-2 datu analīze veikta 16 apakšpoligonu ietvaros. Atmosfēras korekcijas piemērs 2020. gada 15. augusta satelītuzņēmumam redzams 7. attēlsā.

Jauniegūtie faili tiek sistematizēti atbilstoši iepriekš izveidotajai datu bāzes struktūrai, veidojot atsevišķu Oracle datu bāzes tabulu, kas atvieglo iespēju sekot līdzi datu apstrādes posmam.



7. attēls. 2020. gada 15. augusta Sentinel-2 satelīta uzņēmums redzamajā spektrā 11. analīzes poligonā pirms (kreisā puse) un pēc (labā puse) atmosfēras korekcijas pielietošanas.

3.2.2. DATU KOREĢISTRĀCIJA

Lai gan satelītdata sākotnējā apstrāde L0 un L1 līmeņos iekļauj telpisku piesaisti globālajam koordinātu tīklam, tomēr nelielas satelīta orbītas novirzes, kā arī mērījumu leņķu atšķirības mēdz ieviest kļūdas precizējot pikseļu atrašanās vietu. Šādas novirzes ir raksturīgas gandrīz visām attālināto novērojumu datu kopām (Kennedy & Cohen, 2003). Niecīgās atšķirības var radīt neprecizitātes, nosakot krasta līnijas atrašanās vietu un novērtējot tās izmaiņas laikā. Lai nodrošinātu mērījumu vienmērību, aktivitātes ietvaros tika veikta atkārtota datu ģeotelpiska piesaiste, ko satelītu datu kontekstā sauc par datu koreģistrāciju.

Lai to efektīvi varētu paveikt, sākotnēji nepieciešams izvēlēties labākās satelītainas pret kurām tiks piesaistīti jeb ģeoreferencēti visi pārējie uzņēmumi. Labākie uzņēmumi izvēlēti, vadoties no mākoņainības, pie pēc iespējas mierīgākas jūras un laikapstākļiem. Katram no 16 poligoniem analizētajā laika periodā no 2015. līdz 2020. gadam izvēlēts viens labākais uzņēmums.

Datu koreģistrācija pret labākajām ainām veikta, izmantojot “arosics” procesoru (Scheffler et al., 2017). “arosics” veic telpisko piesaisti uz spektrālās vienlīdzības principa – katrs satelītuzņēmums tiek pārveidots spektrālajā domēnā ar Furjē transformācijas palīdzību, atrodot līdzīgus objektus objektus (kuri Furjē spektrā

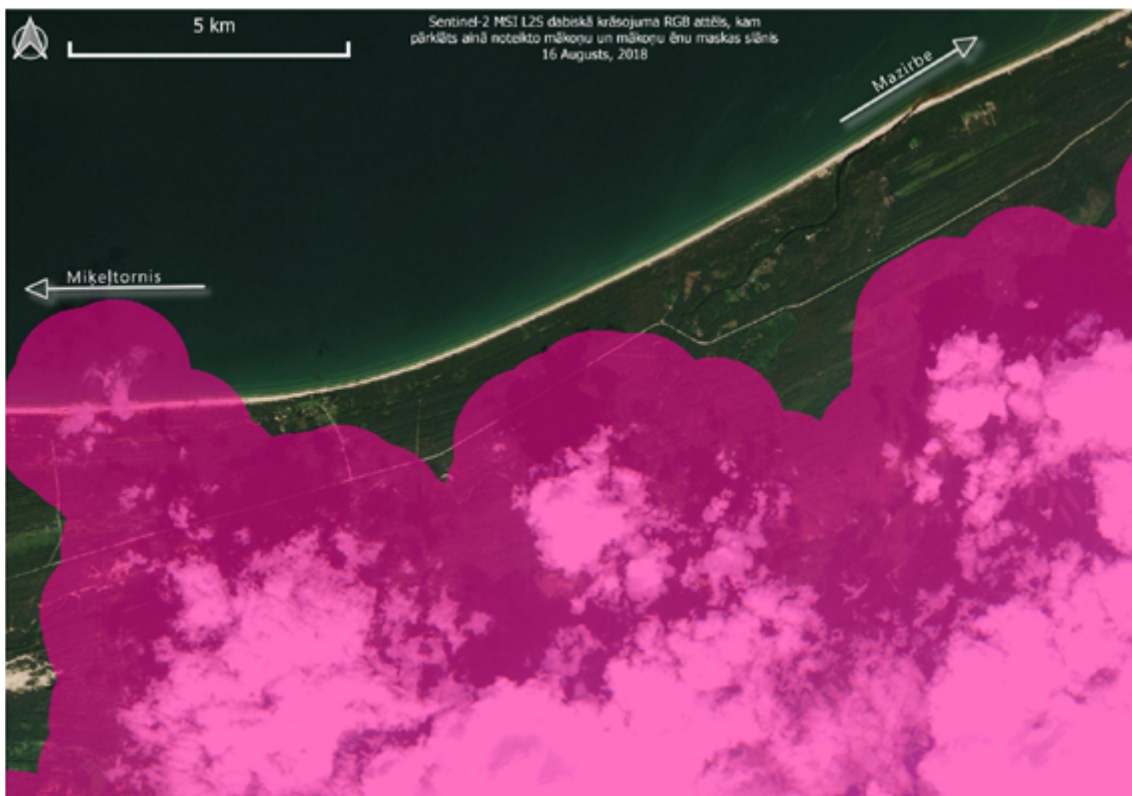
reprezentēti kā frekvences) abās salīdzināmajās ainās un novietojot tās vienā atrašanās vietā. Pēc tam algoritms veic inverso transformāciju uz telpas domēnu, pēc kuras abi salīdzināmie satelītattēli praktiski atrodas vienā vietā. “arosics” ļauj veikt divu veidu transformācijas – globālo, kuras ietvaros visi pikseļi attēlā tiek transformēti vienā virzienā un attālumā, kā arī lokālo, kuras ietvaros dažādas attēla daļas var tikt transformētas dažādos virzienos un attālumos. Lokālā transformācija nodrošina precīzāku ģeoreferencēšanu mazākā mērogā, tādēļ aktivitātes ietvaros izmantota tieši šī metode. Lokālā ģeotelpiskā piesaiste veikta, pārbaudot attēlu sakritības 500x500 metru režģī, ar maksimālo piesaistes pārvietojuma attālumu 50 metri.

3.2.3. MĀKOŅU MASKĒŠANA

Jebkuru optisko satelītattēlu analīzi ievērojami ietekmē mākoņu un to ēnu klātbūtne satelītuzņēmumā. Dažādas attēlu analīzes metodes, tai skaitā attēla segmentēšanu un klasterizāciju, negatīvi ietekmē izteikti gaišās pikseļu vērtības mākoņu virspusē, vai tumšākas pikseļu vērtības, kuras asociējamas ar mākoņu ēnām. Lai izvairītos no kļūdām, kuras izraisa mākoņu pikseļu klātesamība, nepieciešams veikt mākoņu pikseļu dzēšanu, sauktu arī par mākoņu maskēšanu (8. attēls).

Aktivitātes ietvaros mākoņu maskēšana veikta, izmantojot sen2cloudless algoritmu (Zupanc, 2020). Mākoņu maskas 2017.-2023. gadam lejupielādētas no Google Earth Engine platformas (Gorelick et al., 2017), kurā jau veikts to aprēķins. Izmantojot mākoņu maskas, LVĢMC ietvaros veikta arī mākoņu ēnu noteikšana. Viss mākoņu maskēšanas process īstenots Python programmēšanas valodas vidē, veicot sekojošajos soļus:

1. sākotnēja satelītdatu datu šķirošana, kā liekus marķējot visus pārlidojumus, kuros mākoņu pikseļu skaits bija lielāks par 90%;
2. no Google Earth Engine platformas lejupielādēts mākoņu varbūtības slānis Sentinel-2:Cloud Probability;
3. izveidota mākoņu maska visiem pikseļiem, kuru mākoņu varbūtība bija lielāka par 55%;
4. aprēķināti mākoņu ēnu pikseļi, balstoties Sentinel-2 attēla uzņemšanas laika maksimālajā iespējamajā ēnas garumā, ņemot vērā Saules spīdēšanas leņķi atbilstošajās diennaktīs. Maksimālais iespējamais ēnas garums iestatīts kā 3 km garš.
5. ap izveidotajām mākoņu un ēnu maskām pielietota buferizācijas (*buffer*) funkcija 1,25 km lielumā, kura palīdz novērst dažādas mākoņu un to ēnu klasifikācijas kļūdas.



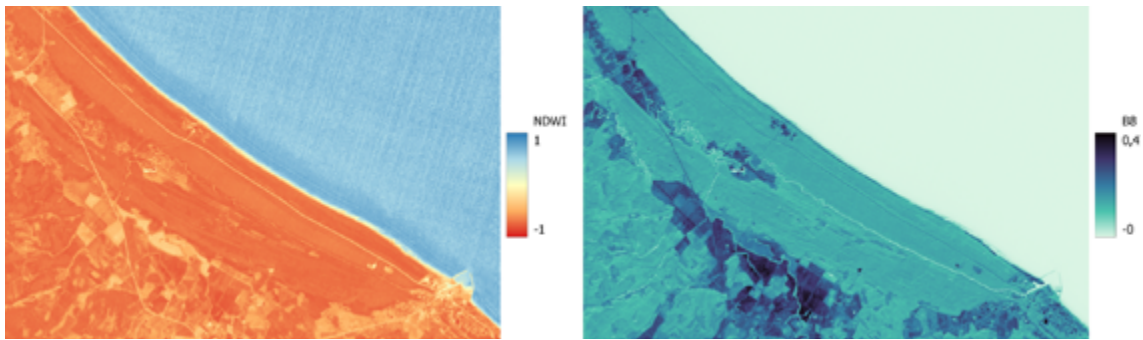
8. attēls Mākoņu, to ēnu un maskas (violetā krāsa) noteikšanas piemērs 16. augusta satelītuzņēmumam ziemeļlatvijā, Irbes apkārtnē.

3.3. Ūdens līniju izdalīšana

Pēc Sentinel-2 datu pirmsapstrādes noteiktas krasta ūdens līnijas. Krasta līniju noteikšana sevī iekļāva vairākus secīgus apakšposmus. Ņemot vērā mākoņu masku pieejamību un satelītattēlu kvalitāti projekta izpildes laikā, analizētas satelītainas no 2017. līdz 2022. gadam. Pēc projekta noslēguma plānots izdalīt arī 2015., un 2016. gada ūdens līnijas.

3.3.1. ŪDENS UN SAUSZEMES AUTOMĀTISKA IZDALĪŠANA

Lai automātiskā veidā izdalītu ūdens līniju, nepieciešams veikt satelītattēlu segmentāciju divās klasēs – sauszemē un ūdenī. Šim iemeslam aktivitātes ietvaros pārbaudījām divas metodes – normalizētās starpības ūdens indeksa (NDWI) klasterizāciju ar k-vidējā klasifikācijas (*k-means clustering*) algoritmu, kā arī Otsu sliekšņa robežas (*Otsu thresholding*) noteikšanas principu uz Sentinel-2 tuvās infrasarkanās joslas (8. joslas) rezultātiem. Abu metožu izejas datu paraugs redzams 9. attēls.



9. attēls. 2022. gada 22. augusta Sentinel-2 pārlidojuma mērījumi pie Mērsaga ūdens un sauszemes automātiskajai izdalīšanai. Kreisajā pusē redzams normalizētās starpības ūdens indekss, labajā – 8. joslas vērtības

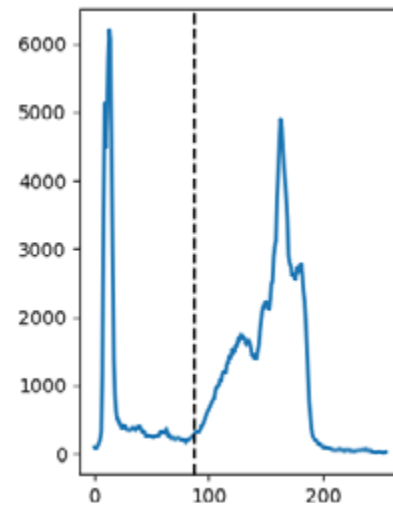
NDWI k-vidējo klasterizācija: Normalizētās starpības ūdens indekss ir plaši izmantots radiometriskais indekss, kurš, izmantojot tuvās infrasarkanās un zaļās starojuma joslas kombināciju, izceļ vietas mērījumos, kuros sastopami ūdens objekti (Gao, 1996). NDWI Sentinel-2 sensoriem tiek izteikts ar vienādojumu:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8},$$

kur B3 un B8 ir attiecīgi Sentinel-2 3. un 8. joslas mērījumi. Indeksa vērtības svārstās intervālā [-1; 1].

NDWI vērtības katram satelītuzņēmumam tika klasificētas divās pēc iespējas atšķirīgākās klasēs, pieņemot, ka vislielākās atšķirības raksturo vietas ainā, kurās respektīvi atrodami ūdens objekti un sauszeme. Klasifikācijai izmantots plaši pielietotais (*k-means-clustering*) algoritms, kurš iteratīvi atrod līdzības punktiem balstoties uz to vērtībām, sadalot tos iepriekš noteiktā skaitā grupu. Pētījumā izmantota algoritma implementācija *SAGA GIS* programmatūras ietvaros (Rubin, 1967; Forgy, 1965).

Otsu sliekšņa robežas noteikšana 8. joslas datos: Otsu sliekšņa robežas izdalīšana ir attēlu segmentācijas tehnika, kura labi pielietojama piekrastes monitoringam. Otsu metode nosaka robežu starp divām vērtību grupām, balstoties datu histogrammas funkcijā, mēģinot iteratīvi samazināt katras grupas variāciju (Otsu, 1979). Robežas noteikšanai nepieciešams priekšnosacījums, ka datos ir skaidri izdalāmas divas dažādas vērtību kopas. Metode līdz ar to labi pielietojama tuvās infrasarkanās joslas datiem (kuri Sentinel-2 atbilst 8. joslai), kurā izteikti redzams vērtību kontrasts starp ūdeni un sauszemi (9. attēls9. attēls). Tieši 8. kanāla izmantošana sliekšņa robežas izdalīšanas gadījumā uzskatāma par optimālu, ņemot vērā samazinātu trokšņa līmeni, salīdzinot ar vairāku kanālu klasifikācijas metodēm, kāds, piemēram, ir NDWI (Yang & Cervone, 2019). Aktivitātē izmantots Otsu sliekšņa noteikšanas algoritms *Python* programmēšanas valodas *scipy-image* papildinājumā (Van Der Walt et al., 2014).

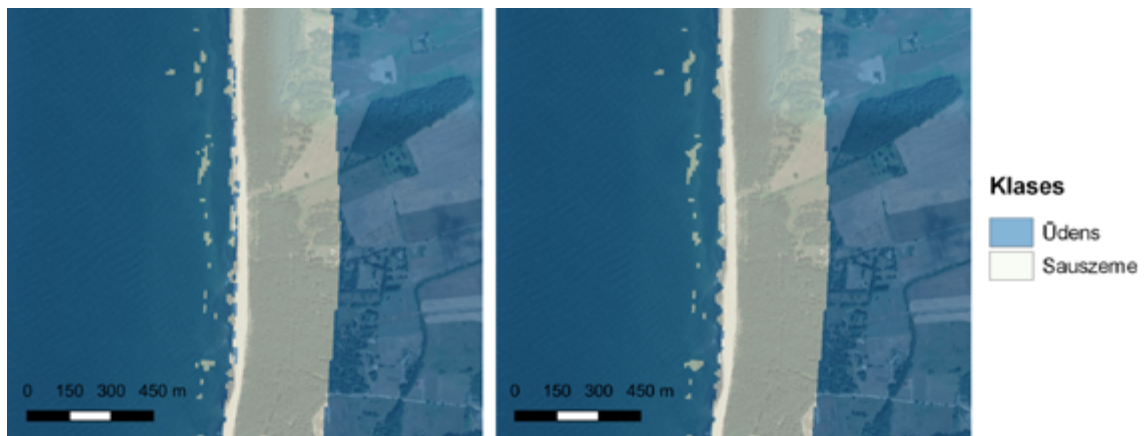


10. attēls. Otsu sliekšņa izdalīšanas paraugs fotogrāfijai (kreisajā pusē), izdalot tumšākās un gaišākās vērtības attēlā divās grupās (vidū). Labajā pusē redzama fotogrāfijas pikseļu sadalījuma funkcija, un ar melno līniju novilkta robeža starp klasēm (Van Der Walt et al., 2014).

Labākās metodes izvēle: Dažādu metožu izveidotais klasifikācijas rezultāts tika manuāli salīdzināts dažādiem piekrastes posmiem, analizējot ūdens-sauszemes klašu korektumu, artefaktu daudzumu un dažādu faktoru (krasta morfoloģijas izmaiņu, koku ēnu, seklūdens apstākļu u.c.) ietekmi uz rezultātiem. Abas metodes vidēji strādāja salīdzinoši labi, bet NDWI k-vidējo klasifikācijas algoritms bieži nepareizi klasificēja ūdens objektu apjomu, īpaši dažādu sarežģītāku krasta morfoloģisko apstākļu, piemēram, upju ietekes jūrā vai sauszemes ragu gadījumos. Līdz ar to kā galvenā ūdens un krasta segmentēšanā izvēlēta Otsu 8. joslas sliekšņa izdalīšanas metode (skat. 12. attēlsu ar izdalīto ūdens līniju salīdzinājumu).

3.3.2. KĻŪDU IZŅEMŠANA

Neskatoties uz optimālas metodes izvēli, vairākas pikseļu vērtības blakus ūdens-sauszemes robežai ir nepareizi klasificētas, galvenokārt dēļ ūdens caurspīdīguma nelielos dziļumos, kā arī krasta nevienmērīgajiem apstākļiem. Lai novērstu nelielu nepareizi klasificētu pikseļu ietekmi uz krasta izmaiņu analīzes rezultātiem, aktivitātes ietvaros tika pielietota izpludināšanas-erozijas attēlu apstrādes metode (*dilation-erosion*). Šis process pielieto divus slīdošus filtrus attēlam, kuri secīgi izpleš un pēc tam samazina katru objektu attēlā atbilstoši pielietotā filtra izmēram (Dong, 1997). Apstrādes rezultātā nelieli pikseļi tiek iekļauti blakus esošos lielākos objektos (skat. 11. attēlsu). Attēlu morfoloģiskais filtrs 3x3 pikseļu izmērā pielietots katram attēlam uzreiz pēc klasifikācijas procesa, izmantojot SAGA GIS rīku *Morphological filter*.



11. attēls. Piemērs izpludināšanas-erozijas analīzei klasificētai satelītainai pie Ziemupes

3.3.3. LĪNIJU VEKTORIZĀCIJA

Līniju vektorizācija ir rastra (attēlu) pārvēršana vektora datu (līniju) formātā, lai iegūtu ūdens līnijas atrašanās vietu vienkārši analizējamā formā. Līniju vektorizēšana aktivitātes ietvaros veikta ar *gdal_contour* algoritmu, kas veic kontūrlīniju izvilkšanu rastra failā. Aktivitātes ietvaros tika izvilktas kontūras ar soli 0,1 starp ūdens un zemes klasēm, kuras apzīmētas ar vērtībām 0 un 1. Lai iegūtu precīzu viduspunktu starp ūdens un zemes klasēm, atsevišķi tika izvēlēta 0,5 kontūrlīnija. Lai novērstu nepareizu objektu klasifikāciju sarežģītākos krasta morfodinamiskajos apstākļos, visas ūdens līnijas, kuras bija īsākas par 1000 m tika dzēstas no datu kopas. Visbeidzot, lai novērstu nepareizu krasta klasifikāciju iekšzemē, visas līnijas, kuras atradās vairāk kā 250 metru attālumā no ūdens, tika marķētas un dzēstas no datu kopas. Līniju vektorizācijas rezultātu piemērs, kopā ar Otsu sliekšņa robežas un NDWI k-vidējo klasifikācijas rezultātu salīdzinājumu redzams 12. attēls.

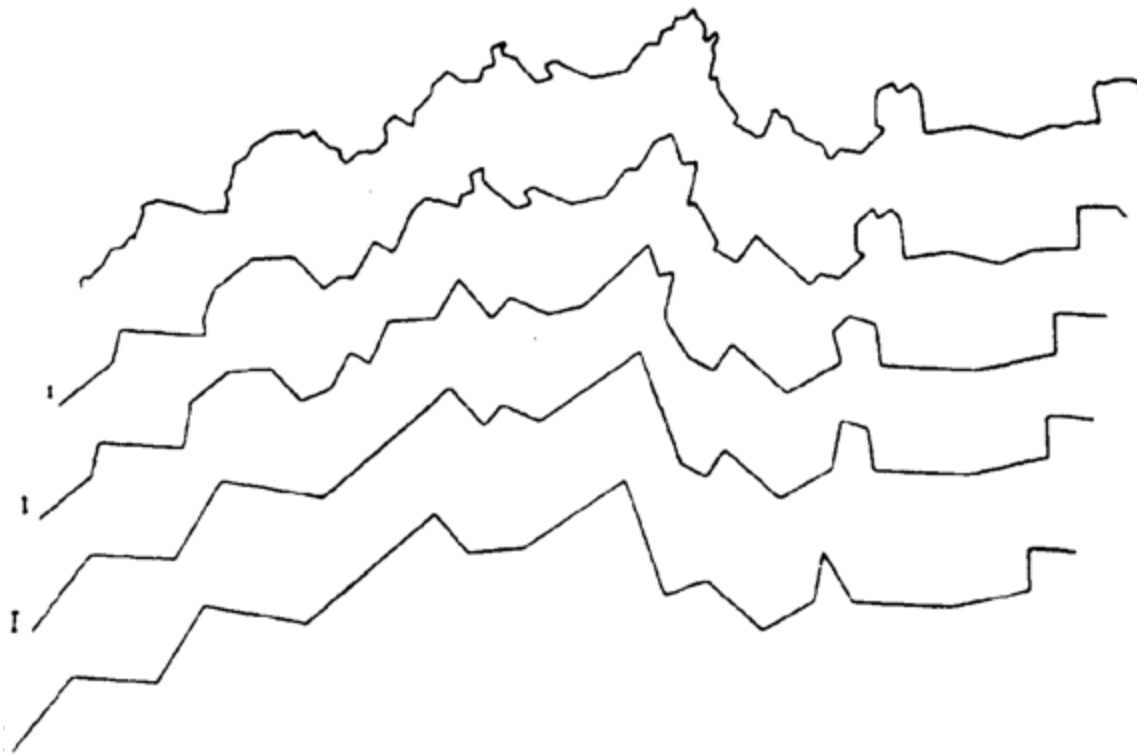
Ar vektorizācijas palīdzību laika posmā no 2017. līdz 2022. gadam kopā tika izdalītas 2588 ūdens līnijas 354 atšķirīgos datumos.



12. attēls. Divu metožu vektorizēto līniju salīdzinājums 2022. gada 21. jūlija satelītainā pie Gaujas ietekas jūrā. Izteikti redzamas atšķirības klasifikācijas algoritma rezultātos – NDWI k-vidējo klasifikācija vietā aprēķina ūdens robežu iekšzemē, tuvāk veģetācijas robežai

3.3.4. LĪNIJU VIENKĀRŠOŠANA

Lai labāk analizētu vidējās krasta attīstības izmaiņas, aktivitātes ietvaros veikta katras noteiktās ūdens līnijas vienkāršošana ar Duglasa-Pekera algoritmu (Douglas & Peucker, 1973). Duglasa-Pekera algoritms ir plaši pielietots kartogrāfijā, lai atvieglotu liela apjoma vektora datu analīzi. Tas veic poligonu vai līniju virsotņu skaita samazināšanu, balstoties uz ievadīto tolerances parametru. Virsotņu samazināšana ļauj iegūt vieglāk apstrādājamus datus, samazinot to izšķirtspēju, kas labāk raksturo vidējās krasta līnijas atrašanās vietu, izņemot viļņu vai nogulumu radītas kļūdas vektorizētajās līnijās. Duglasa-Pekera algoritma darbības piemērs redzams 13. attēls. Līniju pēcapstrādei aktivitātes ietvaros tika pielietots tolerances parametrs 10, kas atbilst 10 metriem dabā.



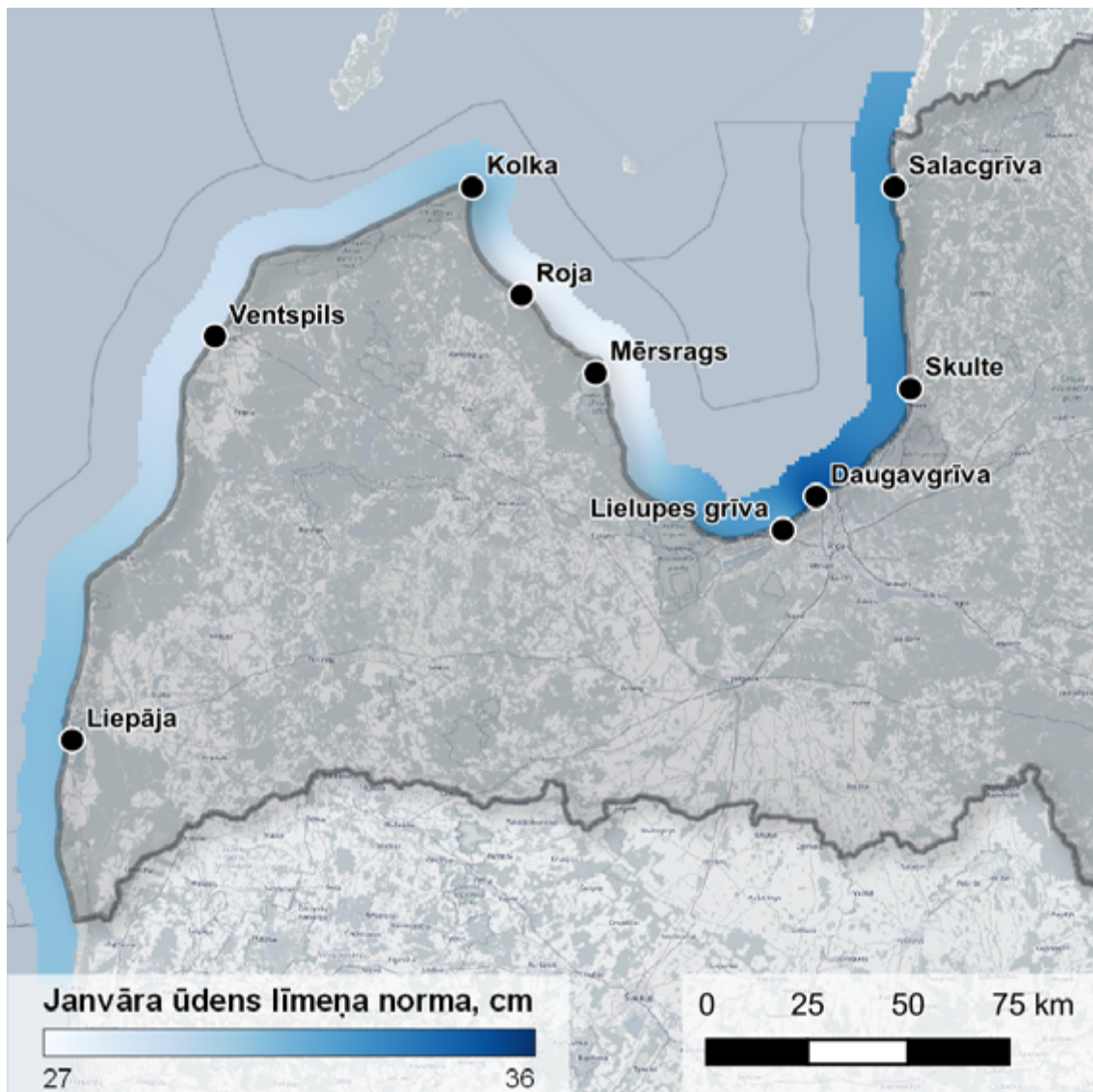
13. attēls. *Duglasa-Pekera algoritma līnijas vienkāršošanas algoritma piemērs, atbilstoši tolerances parametram jeb attālumam, kas redzams kā neliels nogrieznis katras līnijas kreisajā pusē (Douglas & Peucker, 1973)*

3.3.5. AUKSTĀS SEZONAS FILTRĒŠANA

Ūdens līnijām, kuras tika noteiktas gada aukstajos mēnešos, bieži bija raksturīgas problēmas saistītas ar algoritma kļūdām mākoņu daudzuma, sniega vai ledus ietekmē. Ņemot vērā nelielo precīzo pārlidojumu skaitu aukstajā sezonā, no analīzes izņemtas visas ūdens līnijas, kuras izveidotas balstoties uz uzņemtajām satelītainām no novembra līdz martam.

3.3.6. JŪRAS LĪMEŅA FILTRĒŠANA

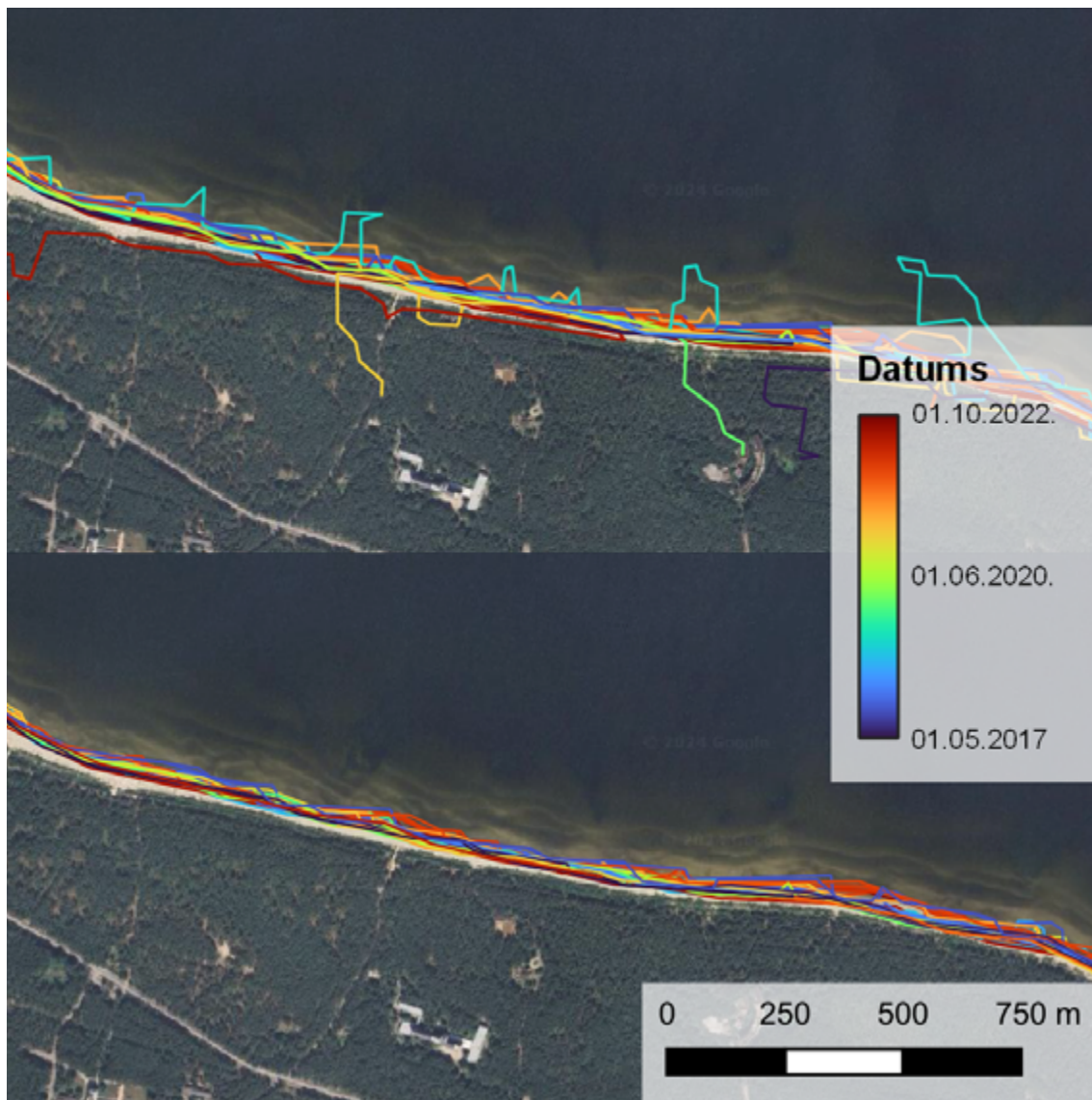
Lai ņemtu vērā ikdienas jūras ūdens līmeņa ietekmi uz krasta procesiem, izstrādāts ūdens līmeņa filtrs nederīgo krasta līniju izdalīšanai no datu kopas. Ūdens līmeņa filtra izveidei izmantoti LVGMC jūras līmeņa mērījumu dati 9 piekrastes monitoringa stacijās (2. attēls) laika posmā no 1991. līdz 2022. gadam. Ikdienas ūdens līmeņa mērījumi sākotnēji interpolēti 1x1 kilometra režģī visā Latvijas piekrastē (atbilstoši piemēram 14. attēls). No režģotajiem ūdens līmeņa datiem aprēķināta klimatiskā norma – 30 gadu vidējās vērtības 1991.-2020. gadam. Katras diennakts, kurā noticis satelīta pārlidojums, mērījumi salīdzināti ar normu. Salīdzinājums neatkarīgi veikts katram no sešpadsmit 2. attēlsā redzamajiem poligoniem – ja kaut viens ūdens līmeņa pikselis poligonā pārsniedza $\pm 0,2$ m atzīmi salīdzinājumā ar klimatisko normu, atbilstošā ūdens līnija datumā un apakšpoligonā izņemta no analizējamās datu kopas. Līdz ar to pieņemts, ka pēc datu filtrēšanas no datu kopas izņemta mainīga ūdens līmeņa ietekme uz krasta līniju.



14. attēls. Izmantoto ūdens līmeņa datu režģī interpolētā janvāra klimatiskā norma un piekrastes ūdens līmeņa novērojumu staciju punkti un nosaukumi

3.3.7. MANUĀLA KVALITĀTES KONTROLE

Pēc visiem augstākminētajiem kvalitātes kontroles soļiem, vēl joprojām datu kopā bija saglabājies liels skaits ūdens līniju, kurās bija redzamas kļūdas. Neprecīzu mākoņu masku vai algoritma darbības rezultātā datos bija atsevišķas līnijas ar izteikti kļūdainām vērtībām. Līdz ar to veikts pēdējais datu pēcapstrādes solis – manuāla kvalitātes kontrole (15. attēls). Datu pārbaudes rezultātā ĢIS programmatūrā izdzēstas acīmredzami kļūdainas līnijas vai atsevišķas līniju virsotnes, kuras algoritms bija aprēķinājis nepareizi.



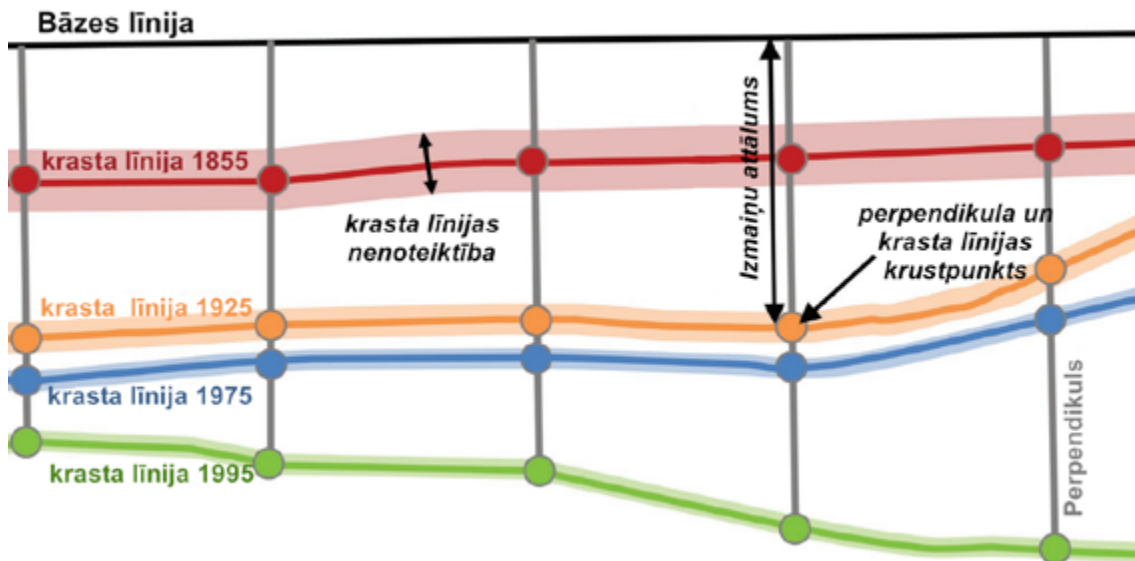
15. attēls. Izdalītās krasta līnijas pie Ragaciema pirms (augšā) un pēc (apakšā) manuālas kvalitātes kontroles

Kvalitātes kontroles procesā no datu kopas izdzēstas vairāk kā 1139 ūdens līnijas. Rezultātā, krasta izmaiņu analīzē izmantotas 1460 ūdens līnijas no 2017. līdz 2022. gadam. Nevienā no analīzes apakšpoligoniem nebija mazāk kā 128 unikālu krasta līniju no dažādiem Sentinel-2 pārlidojuma datumiem.

3.4. Krasta izmaiņu analīze

Krasta līnijas izmaiņas projekta ietvaros raksturotas ar Digitālās krasta līnijas analīzes sistēmās – DSAS 5.1 (*Digital Shoreline Analysis System*) palīdzību. DSAS izstrādājis ASV ģeoloģijas dienests, un ar to tiek īstenots Savienoto valstu krasta izmaiņu monitorings (Himmelstoss et al., 2021). DSAS algoritms krasta līnijas izmaiņas apraksta uz ūdens līnijai perpendikulāriem nogriežņiem (16. attēls), atrodot nogriežņu krustpunktus ar ievadītajām ūdens līnijām. Ņemot vērā krustpunktu pārvietošanos, laika gaitā tiek aprēķinātas dažādas statistikas, piemēram, pārvietojuma attālums vai lineārās regresijas slīpuma koeficients, kas sakrīt ar atkāpšanās vai uzvirzīšanās ātrumu. DSAS programmai iespējams

arī ievadīt dažādus palīgparametrus, piemēram, nenoteiktību, kas ietekmētu statistiku aprēķinu.



16. attēls. DSAS programmas darbības principa piemērs, latviskots pēc (Himmelstoss et al., 2021)

DSAS analīzes veikšanai izveidota atskaites jeb bāzes līnija krasta kustības aprēķinam visā Latvijas piekrastes garumā. Bāzes līnija atrodas vidēji 1-2 kilometru attālumā no krasta līnijas, lai arī nākotnē tā būtu izmantojama krasta dinamikas aprēķinam. Vietās, kurās bija novērojama strauja krasta vērsuma azimuta maiņa, piemēram, Kolkas ragā, bāzes līnija sadalīta divās daļās, lai programma spētu korekti aprēķināt izmaiņas abos krasta virzienos.

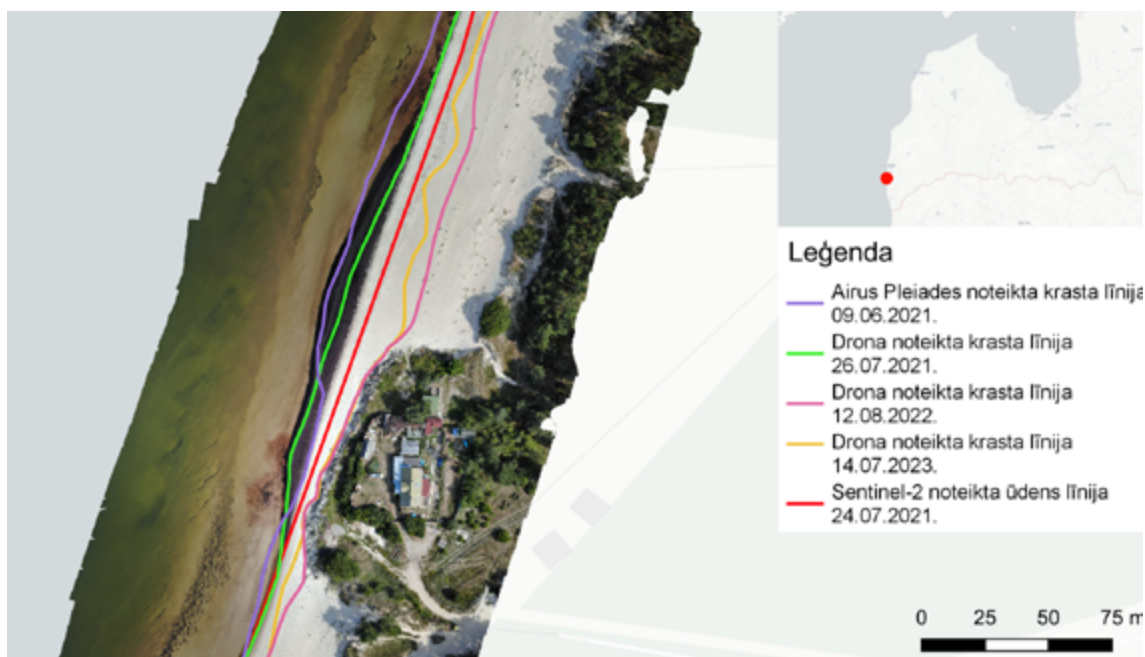
No bāzes līnijas izveidoti 10322 perpendikuli jūras virzienā krasta līnijas aprēķinam, kas aptver visu piekrasti ar savstarpējo attālumu – 50 m. Perpendikulu izveides procesā programma piedāvā izmantot tā saukto izlīdzināšanas (angliski - *smoothing*) parametru, kas pieļauj nelielas novirzes no 90° leņķa perpendikuliem pret krasta līniju, ļaujot labāk izvietot tos vietās, kurās ir straujas krasta ģeometrijas izmaiņas. Pētījumā izmantota izlīdzināšanas parametra vērtība 500.

Pēc perpendikulu izveides veikts krasta izmaiņu aprēķins. DSAS programma nestrādā ar krasta līnijām, kuru virsotnes atrodas pilnīgi vienādās koordinātās, līdz ar to, pirms statistikas aprēķina katra no krasta līnijām pavirzīta nelielā $\pm 0,05$ centimetru intervālā rietumu-austumu virzienā, lai izvairītos no kļūdas statistiku aprēķinos. Lai algoritms spētu tikt galā ar atsevišķām vietām, kur vienu perpendikulu krasta līnija šķērso divas reizes (šādas atsevišķas situācijas novērojamas Ainažu apkārtnē, kur sauszemes un ūdens līnija ir īpaši mainīga), aktivitātes ietvaros izmantots programmas režīms *landward intersection*, kas šādos gadījumos kā pareizu pieņem to perpendikula un ūdens līnijas krustpunktu, kurš atradās tuvāk sauszemei. Kā galvenā izmaiņas raksturojošā statistika izmantota lineārā regresija. Lineārās regresijas aprēķinam pieņemts, ka katrai krasta līnijai ir vienāda nenoteiktība – 10 m, kas atbilst Sentinel-2 pikseļa izšķirtspējai. Līdz ar to lineārās regresijas ātrums, turpmāk atzīmēts ar abreviatūru **LRR** - *linear regression rate* – atbilst regresijas slīpuma koeficientam, un raksturo ūdens līnijas kustību gada laikā. Balstoties uz iepriekš iegūtajām ūdens līnijām no

2017. līdz 2022. gadam, krasta izmaiņas aprēķinātas visos 10322 perpendikulos. Nevieni no perpendikuliem nešķērsoja mazāk par 17 ūdens līnijām (kas atbilst 17 unikāliem satelītainu datumiem, no kuriem noteiktas ūdens līnijas), bet vietās ar visvairāk atsevišķiem bezmākoņu satelīta pārlidojumiem Kolkas raga apkārtnē analizē izmantoto ūdens līniju skaits sasniedza 135.

3.5. Ūdens līniju verifikācija

Sentinel-2 izdalīto ūdens līniju verifikācija veikta, izmantojot aprakstītas drona un Airbus Pléiades komerciālo satelītdatu kopas Latvijas Baltijas jūras piekrastē un Bernātu pilotpoligona teritorijā. Verifikācijas nolūkos datu kopām veikta manuālā ūdens-sauszemes robežas digitalizācija, izmantojot QGIS programmatūru. Digitalizētās ūdens līnijas salīdzinātas ar automātiski izdalītajām Sentinel-2 līnijām tuvākajos atbilstošajos datumos (17. attēls). Lai noteiktu atšķirības starp līnijām, izmantota iepriekš minētā perpendikulu metode, šoreiz veidojot tos ar savstarpējo attālumu 1 m. Drona mērījumu datiem kopā izveidoti 9478 perpendikuli, kuri aptvēra 9,48 km plašu piekrastes joslu, savukārt Airbus Pléiades mērījumu dati aptvēra 24,01 kilometru garu joslu Dienvidlatvijā ar 24001 perpendikuliem. Aktivitātes ietvaros aprēķinātas vidējās atšķirības starp mērījumiem, uzskatot tās par pozitīvām, ja augstas izšķirtspējas datu kopu ūdens līnijas novērotas tuvāk sauszemei, bet par negatīvām – ja novērotas tuvāk jūrai. Analizētas arī citas kļūdas statistikas, kā vidējā kvadrātiskā kļūda, kā arī atšķirību 10 un 90 kvantile.



17. attēls. Verifikācijā izmantotās ūdens līnijas, attēlotas pie Bernātiem uz 2021. gada 26. jūlija bezpilota lidaparāta mērījumu rezultātiem

3.6. Nākotnes ūdens līmeņa un krasta izmaiņu prognoze

Nākotnes ūdens līmeņa prognoze novērtēta atbilstoši LVĢMC (2024) ziņojumā aprakstītajai metodikai. Ūdens līmeņa rezultāti iegūti trijiem IPCC klimata pārmaiņu scenārijiem - SSP 1-2,6, SSP 2-4,5 un SSP 3-7,0. Ņemot vērā klimata

pārmaiņu modeļu izšķirtspēju, raksturotas jūras līmeņa izmaiņas vidēji Latvijā. Klimata pārmaiņu analīzes modeļi raksturoti līdz 2100. gadam.

Nākotnes krasta līniju novērtēšana veikta atbilstoši Brūna likumam. Brūna likums raksturo krasta līnijas atkāpšanos lineāri, atkarībā no zemūdens nogāzes leņķa un prognozētajām jūras līmeņa izmaiņām. Likums pamatojas uz teoriju, ka pludmale, ieskaitot tās sauszemes un zemūdens daļu, vienmēr saglabā līdzsvara profilu. Pieaugot ūdens līmenim, līdzsvara profils migrē zemes iekšzemes virzienā. Līdz ar to, piekrastes atkāpšanos var modelēt ar diviem parametriem – jūras līmeņa izmaiņas un pludmales nogāzes leņķi. To vienkāršoti var izteikt formulā:

$$R = \frac{S}{\tan\beta},$$

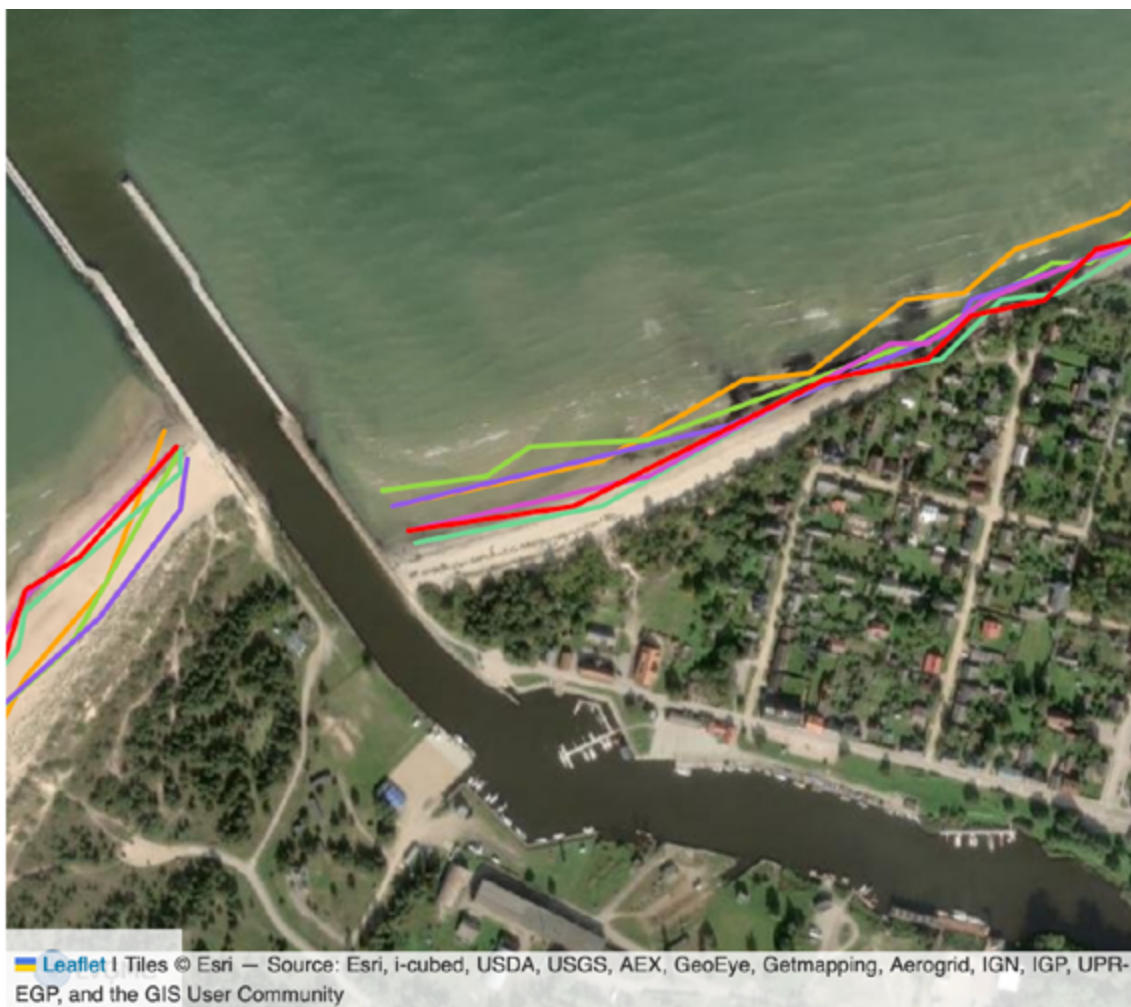
kur R - krasta līnijas atkāpšanās [m], S - jūras līmeņa pieaugums [m] un β - pludmales nogāzes leņķis (Bruun, 1962; Schwartz, 1967). Aktivitātes ietvaros modelēti perpendikuli 14 dažādās Latvijas vietās, mēģinot iekļaut visus piekrastē novērojamos krastu ģeomorfoloģiskos tipus. Nākotnes piekrastes izmaiņu prognozes veidotas ansambļu veidā, ņemot vērā nākotnes jūras līmeņa klimatu pārmaiņu scenārijus.

Svarīgi, ka Brūna likums pieņem, ka krasta atkāpšanos netraucē krasta bioloģiskie, ģeoloģiskie, ģeomorfoloģiskie vai antropogēnie faktori. Tas pieņem, ka krasts varētu netraucēti atkāpties, neskatoties uz veģetācijas vai nogulumu noturības izmaiņām, kā arī neņem vērā vai piekrastē izvietotas dažādas krasta aizsardzības būves. Ņemot vērā to, ka dabā krasta atkāpšanās bieži ir traucēta, uzskatāms, ka Brūna likums bieži pārvērtē krasta līnijas atkāpšanos, līdz ar to pētījumā pielietots krasta atkāpšanās pārvērtējuma koeficients 0.75, ar kuru reizināti atkāpšanās prognozes rezultāti. Koeficients izvēlēts atbilstoši (Vousdoukas et al., 2020) pētījumam.

Neskatoties uz pielietoto korekciju, uzskatāms, ka ar Brūna formulu iegūtie rezultāti pieņemami par indikatīviem, un precīzai krasta līnijas atkāpšanās modelēšanai jāveic padziļināti pētījumi.

3.7. Mediānu krasta līnijas izveide

Lai labāk vizualizētu krasta līnijas rīkā, visām apstrādātajām satelītainām pēc mākoņu maskēšanas posma veikts mediānu aprēķins, grupējot attēlus gadu ietvaros. Katram gadam no visām pieejamajām mākoņu maskētajām ainām aprēķinātas mediānu vērtības, iegūstot vienu mediānas attēlu visā Latvijas teritorijā. No gadu mediānu ainām veikta krasta līniju izdalīšana pēc analogas, augstāk aprakstītas metodes ūdens līniju izdalīšanai. Rezultātā iegūtas mediānas krasta līnijas, kuras raksturo vidējo situāciju katrā Latvijas vietā viena gada ietvaros. Mediānu krasta līnijas attēlotas klimata pārmaiņu analīzes rīkā (https://klimats.meteo.lv/klimats_latvija/klimata_riks/) (18. attēls).



Izvēlies gadu(s):



18. attēls. *Mediānu krasta līniju attēlojums pie Pāvilstas klimata pārmaiņu analīzes rīkā*

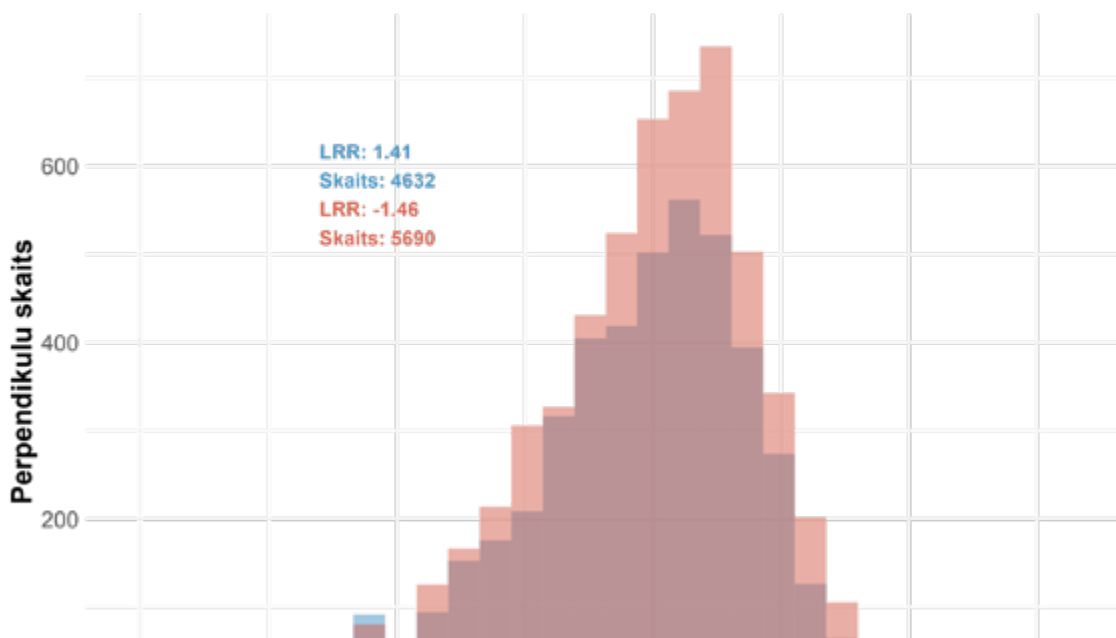
4.

REZULTĀTI

Aktivitātes rezultātos apkopoti ar DSAS programmu noteiktie lineārās regresijas ātrumi (saīsinājumā – LRR). Analizējot rezultātus, jāatceras **relatīvi īsais laika posms satelītu uzņēmumiem, no kuriem tie iegūti**, kā arī fakts, ka **novērotās krasta līnijas izmaiņas** nav precīzi raksturojamas ar taisnes vienādojumu – tās ļoti reti notiek laikā vienmērīgi. Līdz ar to, aprēķinātos **erozijas ātrumus** nepieciešams uztvert indikatīvi – tie norāda uz reģionā dominējošajām krasta attīstības tendencēm **un nav izmantojami precīzai nākotnes krasta atkāpšanās vai uzvirzīšanās modelēšanai!**

Krasta izmaiņu analīze veikta divos veidos – analizējot kopējās izmaiņas Latvijā (19. attēls), un slīdoši aprēķinot vidējās krasta izmaiņas 500 m rādiusā ap katru perpendikulu, lai iegūtu vienmērīgākās krasta izmaiņu tendences. Krasta izmaiņu ātrums līdz ar to sadalīts piecās klasēs – **izteiktas erozijas** (krasta atkāpšanās ar ātrumu >2 m/gadā), **nelielas erozijas** (krasta atkāpšanās ar ātrumu no 1 līdz 2 m/gadā), **nebūtisku izmaiņu** (nebūtiskas izmaiņas ± 1 m/gadā), **nelielas akumulācijas** (krasta uzvirzīšanās ar ātrumu no 1 līdz 2 m/gadā) un **izteiktas akumulācijas** (krasta uzvirzīšanās ar ātrumu >2 m/gadā) (20.-33. Attēli). Papildinot nākotnes datu bāzi ar satelītu mērījumiem, paredzams, ka krasta izmaiņu novērtējuma izšķirtspēja uzlabosies.

4.1. Krasta erozijas analīze



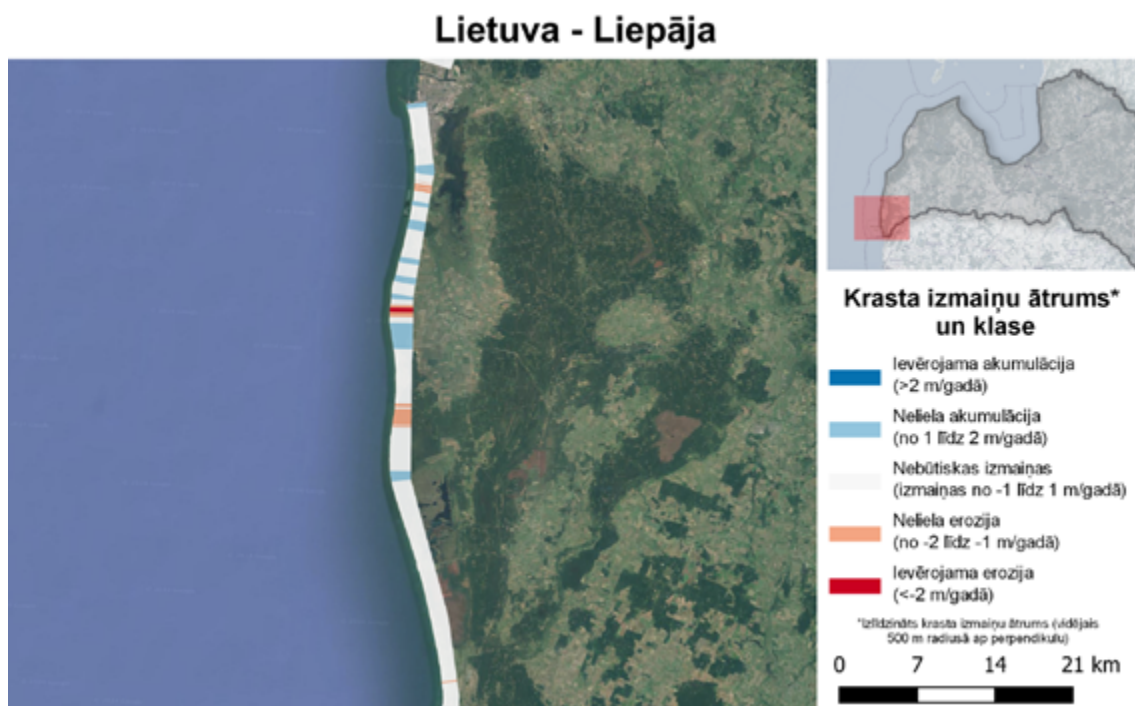
19. attēls. Krasta izmaiņu ātruma histogramma.

Skaits apzīmē perpendikulu skaitu, kurš izmantots analīzē. Zilā krāsā norāda uz akumulācijas procesu, sarkanā – erozijas. LRR apzīmē lineārās regresijas ātrumu – krasta izmaiņu ātrumu gadā.

Atbilstoši aktivitātes rezultātiem, Latvijas piekrastē nedaudz dominē krasta erozijas process. Vairāk nekā 55% no visiem 10322 perpendikuliem norāda uz krasta atkāpšanos ar vidējo atkāpšanās ātrumu ir 1,46 m gadā. Tomēr, akumulācijas process arī ir izplatīts gana plaši – kopā 4632 perpendikuli norāda uz krasta līnijas uzvirzīšanos jūras virzienā ar vidējo virzības ātrumu 1,41 m/gadā.

Lielākajā daļā Latvijas krasta dominē salīdzinoši nelielas krasta izmaiņas ar ātrumu līdz ± 2 metriem gadā. Lielākās izmaiņas novērojamas atsevišķās vietās – novērojami gan intensīvas uzvirzīšanās, gan atkāpšanās procesi. Īpaši straujas izmaiņas ar izmaiņu ātrumu virs 5 m/gadā novērotas 152 erozijas un 126 akumulācijas profilos. Tātad, vairāk kā 7 kilometros Latvijas piekrastes īpaši izteikti notiek erozijas procesi, savukārt 6 kilometros – intensīva krasta virzība jūras virzienā.

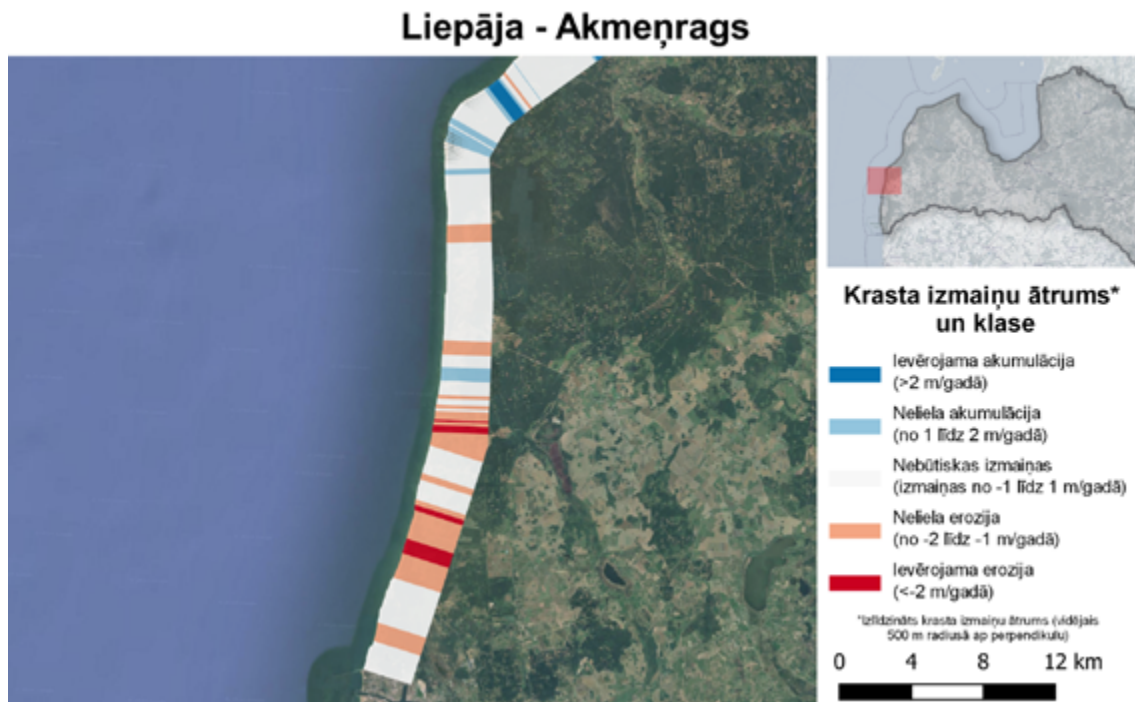
4.2. Krasta erozijas analīze



20. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Lietuvas robežas līdz Liepājai

Baltijas jūras piekrastes daļā no Lietuvas robežas līdz Liepājai (20. attēls) krasta līnija pēdējo piecu gadu laikā ir atradusies līdzsvarā. Pašā Latvijas dienvidu daļā, apmēram 20 kilometru garumā Rucavas apkārtnē konstatētās krasta izmaiņas nepārsniedza ± 1 metru gadā. Intensīvākie procesi šajā reģionā novēroti Bernātu dabas parkā un tā apkaimē – dabas parka vidienē apmēram 2 km garā posmā novērota īpaši intensīva krasta atkāpšanās ar ātrumu >3 m/gadā. Bernātu dabas parkā jau izsenis novērota krasta atkāpšanās, un šī pētījuma rezultāti to vēlreiz apstiprina. Bernātu apkārtnē novērojami arī dinamiski apstākļi, kuros intensīvas erozijas posmi mijas ar vairākiem krasta akumulācijas posmiem. Neliels apdraudējums krastam novērojams arī Jūrmalciema apkārtnē, kā arī uz dienvidiem no Liepājas, kur krasta ieliekumā redzami nelielas erozijas procesi. Liepājas pilsētas dienvidu daļai, savukārt, būtisks apdraudējums nav novērots,

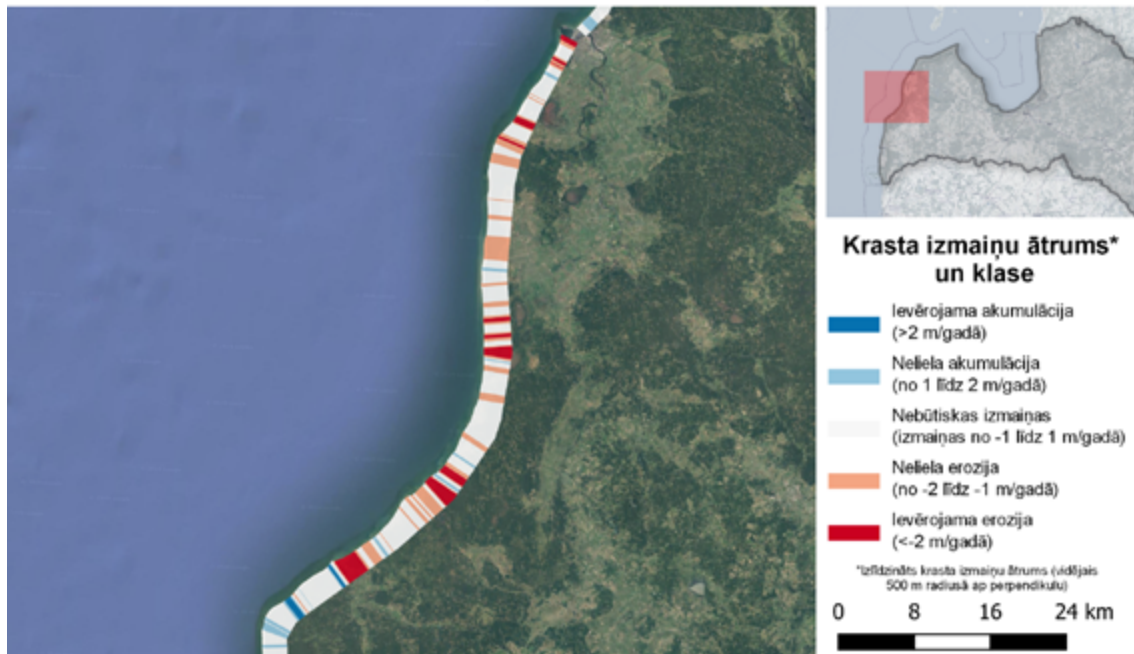
domājams, dēļ akumulatīviem procesiem, kurus veicina Liepājas dienvidu mola ietekmētā garkrasta sanešu plūsma.



21. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Liepājas līdz Akmeņragam

Nemot vērā intensīvo saimniecisko darbību Liepājas pilsētā, šīs aktivitātes ietvaros netika analizēta teritorija starp Liepājas dienvidu un ziemeļu mola. Apskatot krasta līniju ziemeļu virzienā no Liepājas (21. attēls), redzams, ka apmēram 10 km garā posmā no Liepājas ziemeļu mola līdz Ziemeļi (posms iekļauj Karostu un Liepājas notekūdeņu attīrīšanas iekārtas) novērojami vairāki īpaši intensīvas erozijas posmi, vietām pat sasniedzot atkāpšanās ātrumus 5 m/gadā. Arī šajās teritorijās erozijas problēma ir apzināta iepriekš, un krasts stiprināts ar dažādiem preterozijas risinājumiem (Lapinskis & Grīne, 2014), bet šī pētījuma rezultāti norāda uz straujām izmaiņām pēdējo gadu laikā. Kopumā redzams, ka erozīvie procesi vairāk dominē atsevišķos posmos, kas bieži saistīti ar nelielu krasta vērsuma azimuta maiņu, savukārt erozijas apgabali tiek kompensēti ar tuviem apgabaliem, kuros raksturīga sanešu materiāla nogulsnešaas. Akumulatīvi procesi novēroti ap Akmeņragu, izteiktākie no tiem raga ziemeļu daļā, kur vietām novērojama krasta uzvirzīšanās ar ātrumu 5 m/gadā.

Akmeņrags - Ventspils



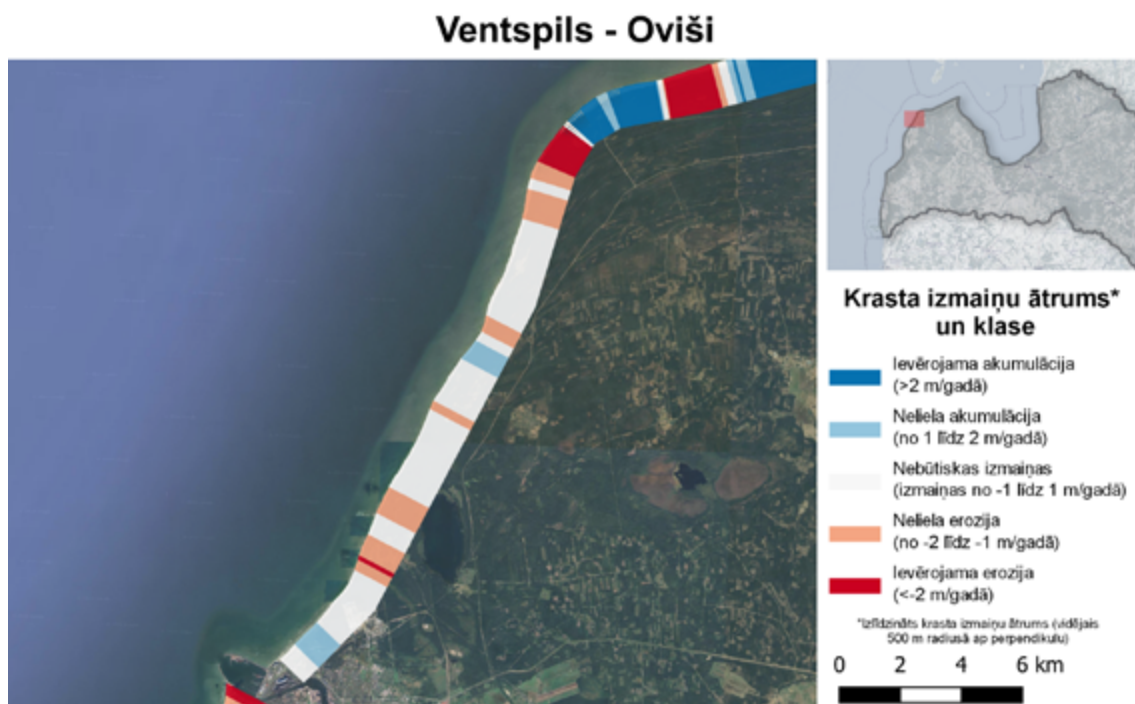
22. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Akmeņraga līdz Ventspilij

Viens no dinamiskākajiem posmiem Latvijas piekrastē ir Baltijas jūras krasts no Akmeņraga līdz Ventspilij (22. attēls). Šajā reģionā lielākoties dominē erozijas procesi – novērojams viens no intensīvākajiem krasta atkāpšanās ātrumiem visā Latvijā. Rezultātos redzams, ka sanešu materiāls no šī reģiona galvenokārt tiek pārgulsnēts tālāk ziemeļu virzienā, jo tikai vietām dominē nelieli īsi posmi, kuros vērojama sanešu akumulācija.

Ziemeļos no Akmeņraga izteikti novērojama akumulatīvi procesi – domājams, ņemot vērā Pāvilostas dienvidu mola ietekmi uz garkrasta sanešu plūsmu. Pretēja situācija novērojama Pāvilostas ziemeļu daļā – visdrīzāk saistībā ar Pāvilostas molu pagarināšanu, kopš 2017. gada ievērojami pastiprinājušies krasta atkāpšanās procesi. Pāvilostas pilsētas ziemeļu daļā novērojama strauja krasta atkāpšanās – vietām erozijas ātrumi pārsniedz 7 m/gadā. Šī vieta uzskatāma par vienu no erozijas ziņā ietekmētākajām visā Latvijā. Ziemeļrietumu virzienā no Pāvilostas novērojams pludmales ieliekums, kurā pēdējo piecu gadu laikā novēroti līdzsvara apstākļi. Intensīva erozija turpinās pie Labraga, kur novērojami krasta atkāpšanās ātrumi līdz pat 4 m/gadā. Par erozijas procesiem reģionā liecina arī izteiktais stāvkrasts. Satelītdatos novērota neliela krasta atkāpšanās Jūrkalnes ciemā, savukārt intensīva erozija turpinās ziemeļu virzienā aiz Jūrkalnes, līdz pat Sarnātes ciemam, kurā atkāpšanās ātrums sasniedz pat 4 m/gadā. Jāatzīmē, ka erozija periodiski novērojama visā reģionā, un, lai gan pēdējos piecos gados ir intensīvāk izplatījusies atzīmētajos posmos, uzskatāms, ka visā šajā piekrastes apgabalā dominē erozijas procesi.

Ziemeļu virzienā no Sarnātes līdz Užavai vērojama neliela krasta atkāpšanās ar ātrumu līdz 2 m/gadā, kas mijas ar vairākiem posmiem, kuros nav novērotas būtiskas izmaiņas. Posmā no Užavas līdz Ventspilij arī novērojamas vairākas vietas ar ievērojamu krasta atkāpšanos. Interesanti, ka Ventspils pilsētas

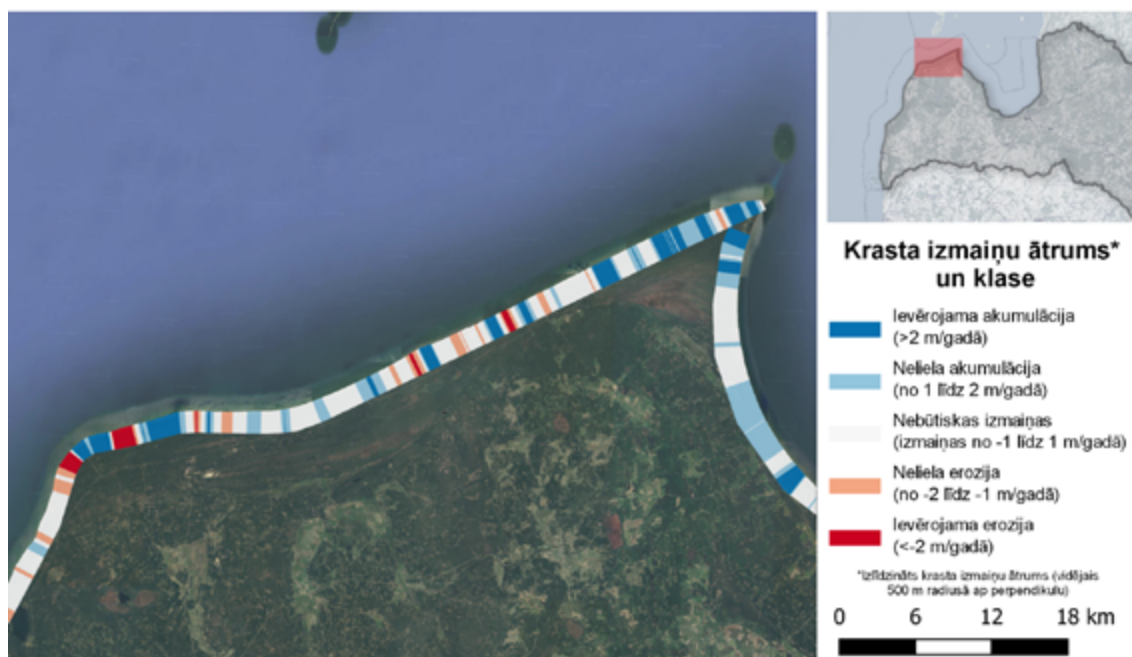
teritorijā izteikta atkāpšanās novērojama pie Ventspils dienvidu mola – vietā, kurā vēsturiski erozijas problēmu nav bijis.



23. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Ventspils līdz Ovišiem

Pretēji procesi Ventspils dienvidu molam novērojami ziemeļos no Ventspils (23. attēls) Šeit dominē krasta akumulācijas procesi. Visa Ventspilij pietuvinātā teritorija līdz pat Staldzenei ir ievērojami ietekmēta saistībā ar cilvēku saimniecisko darbību Ventspils ostā. Līdz ar to novērotie akumulācijas procesi Ventspils ziemeļu daļā, domājams, kompensē sanešu trūkumu un tam sekojošos erozijas procesus Ventspils dienvidu daļā. Staldzenes apkārtnē, savukārt novērojama krasta erozija, kuras ātrums vietām pārsniedz 2 m/gadā. Relatīvi nemainīgi krasta apstākļi turpinās ziemeļu virzienā līdz pat Ovišu ragam, vietām mijoties nelieliem erozijas un akumulācijas posmiem. Ovišu rags ir izteiksmīgi redzams Latvijas kontūrā – tajā krasta līnijas vērsums pagriežas no ziemeļaustrumu-dienvidrietumu virziena uz izteiktu austrumu-rietumu virzienu. Tas ievērojami ietekmē valdošo vēju un līdz ar to arī viļņu iedarbību uz pludmali, un piekrastē novērojami izteikti dinamiski procesi. Ovišu raga dienvidu daļā, pirms krasta vērsuma izmaiņām, novērojama intensīva krasta atkāpšanās ar ātrumu virs 5 m/gadā. Krastam turpinoties austrumu-rietumu virzienā, redzams, ka materiāls tiek pārskalots un nogulsnēts, kam raksturīgi aktīvi sanešu akumulācijas procesi ar krasta uzvirzīšanās ātrumiem pat līdz 15 m/gadā. Tomēr, uzreiz pēc intensīvās akumulācijas posma apmēram 3 km garumā novērojama vēl viena erozijas-akumulācijas posma mija, kurā aptuveni 1,5 km garš erozīvais posms (atkāpšanās ātrums līdz 5 m/gadā) mijas ar vēl vienu, garāku, akumulatīvu krasta posmu, kurā uzvirzīšanās ātrums sasniedz 5 m/gadā. Līdz ar to piekrastē novērojama Ovišu raga pārvietošanās ziemeļaustrumu virzienā.

Oviši - Kolka



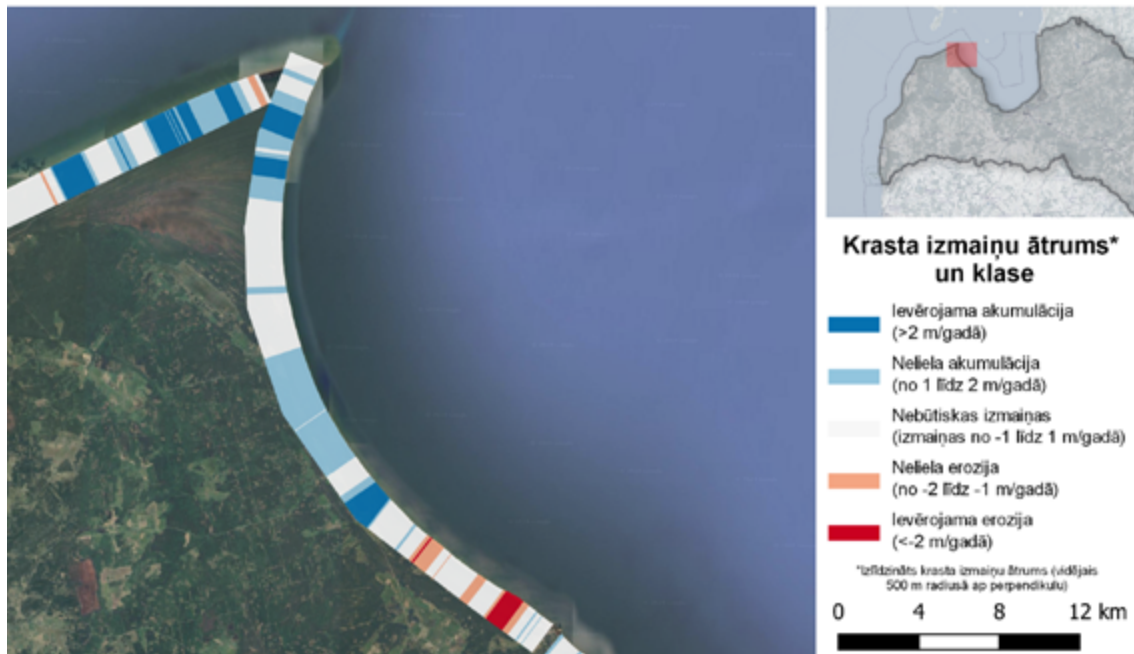
24. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Ovišiem līdz Kolkai

Apskatot izmaiņas Latvijas piekrastē no Ovišu līdz Kolkas rājiem (24. attēls), redzams, ka posmā kopumā dominē akumulatīvi procesi. Atsevišķās vietās novērojamas arī krasta atkāpšanās pazīmes, tomēr šie krasta reģioni ir relatīvi īsi salīdzinājumā ar lēzenajiem, akumulatīvajiem krastiem reģionā.

Austrumu virzienā no Ovišu raga redzams neliels posms ar erozīvu un akumulatīvu procesu miju, kuru varētu ietekmēt no Ovišu raga dinamiskie procesi. Ovišu dabas lieguma austrumu teritorijā pludmale kopumā saglabā dinamisko līdzsvaru, kur vietām ir vērojami atsevišķi akumulatīvi procesi. Šādi krasta apstākļi saglabājas līdz pat Sīkragam kur, nelielā raga ietekmē pie Irbes upes grīvas, novērojams krasta posms ar izteiktu erozīvu-akumulatīvu procesu miju. Erozīvu-akumulatīvu krastu mija turpinās līdz pat Mazirbes ciemam, ar vairākiem, līdz 1 km gariem, atsevišķiem erozijas-akumulācijas posmiem, kopumā nedaudz vairāk dominējot krasta uzvirzīšanās procesiem. Uz ziemeļaustrumiem no Mazirbes līdz pat Kolkas ragam vērojams izteikti akumulatīvs reģions, kur eroziju var novērot tikai nelielā posmā Pitraga apkārtnē.

Kolkas ragā, līdzīgi kā Ovišu ragā, saistāms ar dinamiskiem krasta procesi krasta azimuta virziena izmaiņu dēļ. Pētījuma ietvaros aptvertajā laikā posmā no 2017. līdz 2022. gadam bija redzama izteikta raga migrācija sanešu plūsmas ietekmē. Ap Kolkas ragu krasta mainība bija ievērojami lielāka nekā citās Latvijas piekrastes teritorijās. Tomēr, pētījuma rezultāti rāda, ka pēdējo piecu gadu laikā Kolkas apkārtnē ir novērojama krasta akumulācija, tikai vietām mijoties ar ilgtermiņa erozijas posmiem. Jāatzīmē, ka piecu gadu periods ir pārāk īss dinamisku piekrastes apstākļu analīzei, līdz ar to precīzāki rezultāti par šo teritoriju var tikt iegūti tikai turpinot attālināto monitoringu ilgākā laika posmā.

Kolka - Roja

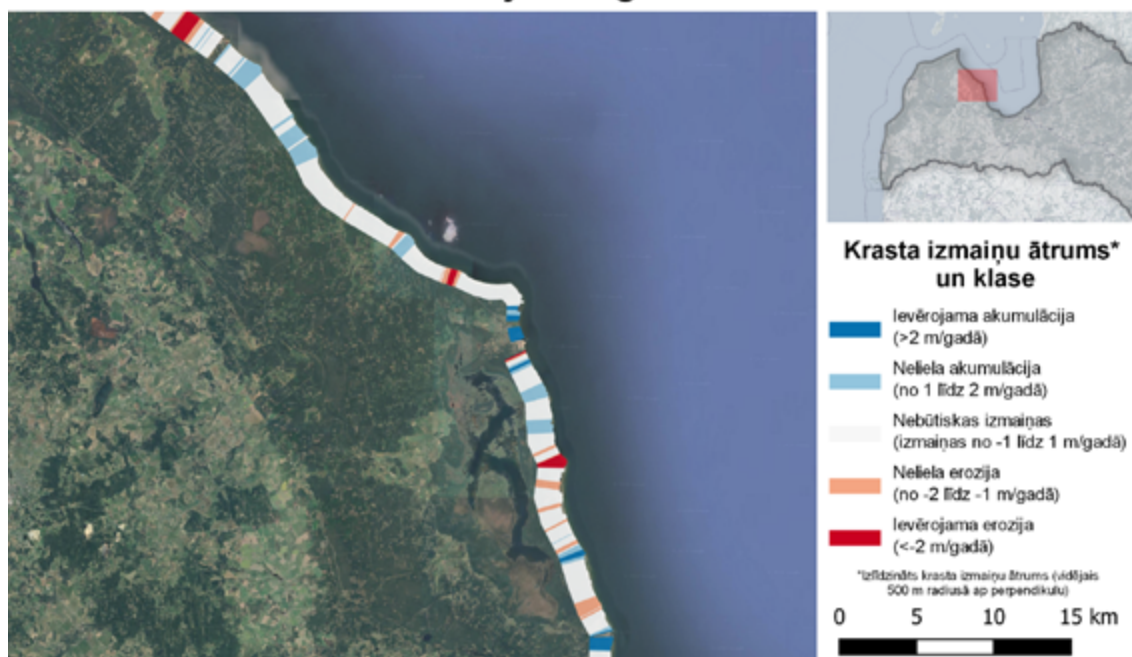


25. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Kolkas līdz Rojai

Rīgas jūras līča piekrastes ziemeļu daļā uz austrumiem no Kolkas raga (25. attēls) vēsturiski novērota neliela sanešu materiāla piegāde. Kopumā piekrastes apstākļi šeit ir relatīvi mierīgi, ar palielinātu akumulācijas procesu pārsvaru.

Kolkas pilsētas piekrastē izteikti dominē sanešu uzkrāšanās – krasta virzība jūras virzienā var sasniegt ātrumu 4 m/gadā. Uz dienvidiem no Kolkas – Melnsila apkaimē krastā mijas nelieli erozijas/akumulācijas posmi un krasts saglabā kopēju līdzsvaru. Krasta virzienam mainoties no ziemeļu-dienvidu uz dienvidaustrumu-ziemeļrietumu virzienu ielokā pie Ģipkas ciema novērojama izteikta sanešu akumulācija, krastam virzoties jūras virzienā pat ar ātrumu 3 m/gadā. Vēl tālāk uz dienvidaustrumiem, Rojas virzienā, sāk dominēt erozīvi procesi. Vairākās vietās krasts kopš 2017. Gada ir atkāpies – visizteiktākais posms ar erozijas elementiem novērojams apmēram 1,5 kilometrus uz ziemeļrietumiem no Rojas ziemeļu mola, kurā erozijas ātrums var sasniegt 3 m/gadā. Jāatzīmē gan, ka krasta morfoloģijai šajā vietā ir raksturīga lagūnu veidošanās, līdz ar to novērotie lieli erozijas ātrumi varētu būt saistīti ar relatīvi lielo krasta dinamiku šajā reģionā. Pie Rojas ziemeļu mola vairāk dominē akumulatīvi procesi, tomēr, kopumā, šajā vietā krasts saglabā līdzsvaru. Virzienā uz dienvidrietumiem no Rojas mola satelītdati ataino relatīvu krasta līdzsvaru, tomēr, jāņem vērā, ka šajā vietā pludmale ir salīdzinoši šaura (tās platums no veģetācijas līnijas līdz ūdenim ir mazāks par 10 metriem), līdz ar to var rasties augstāka neprecizitāte satelītmērījumos. Turklāt, bez šaurās pludmales, ir arī citas pazīmes, kuras norāda uz sanešu materiāla deficītu – neliels stāvkrasts, sanešu granulometriskais sastāvs un laukakmeņu īpatsvars. Līdz ar to, precīzākai situācijas raksturošanai nepieciešami pagarināti monitoringa mērījumi.

Roja - Engure

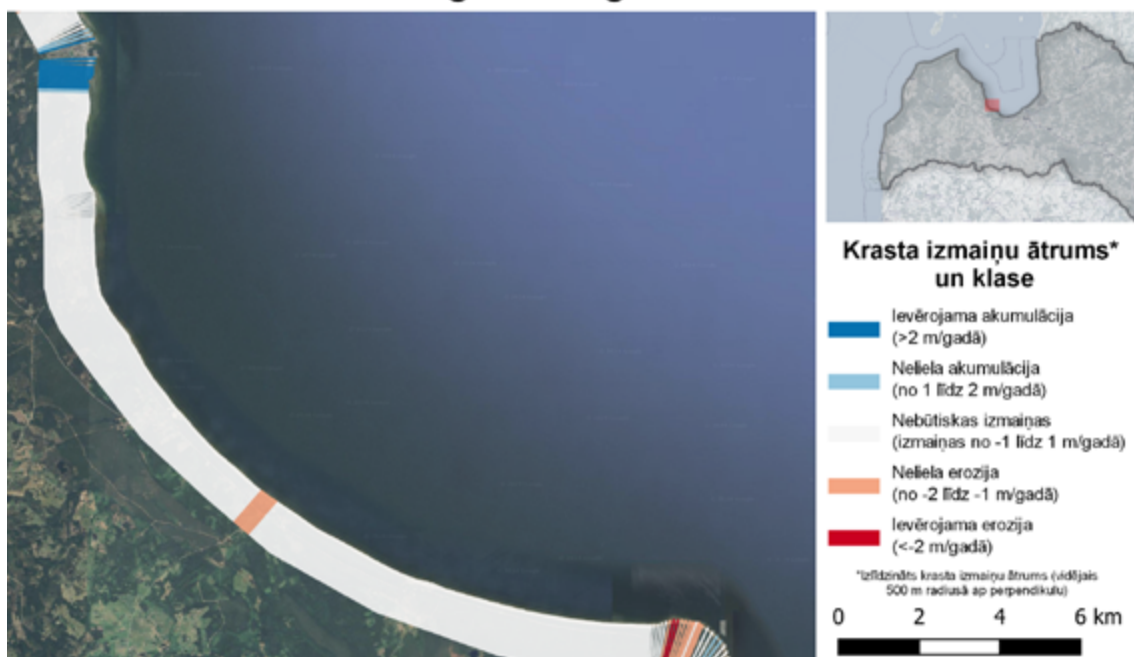


26. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Rojas līdz Engurei

Rīgas līča rietumu piekrastes vidusdaļā, posmā no Rojas līdz Engurei (26. attēls) kopumā raksturīga procesu mija. Krasta vērsums šajā posmā ievērojami mainās, un krasta procesus šeit ietekmē Mērsrags kā arī šī posma dienvidu daļā, starp Mērsragu un Enguri – novērojami izteikti mierīgi jūras apstākļi, ar nelielu sanešu plūsmu un apauguma veidošanos piejūrā.

Dienvidu virzienā no Rojas, Kaltenes apkārtnē, redzams, ka pēdējos piecos gados krasts ir bijis samērā stabils, vietām ar lielāku pārsvaru novērojami akumulācijas procesi. Līdzīga situācija vērojama arī tālāk uz austrumiem, līdz pat Mērsragam, tomēr, šeit akumulācijas procesus pārtrauc atsevišķi krasta iecirkņi ar erozijas pārsvaru – vietām krasta atkāpšanās sasniedz pat 4 m/gadā. No Mērsraga uz dienvidiem krastā vērojama morfoloģiskas izmaiņas. Krasta vērsuma izmaiņu rezultātā (krasts iegriežas ziemeļu-dienvidu virzienā līdz pat Engurei) pludmale veido lēzenu, garu zemūdens nogāzi, kas ir daļēji aizaugusi un, lēnās viļņu darbības rezultātā, reģionā izteikti dominē sanešu akumulācijas procesi. Tas ir labi redzams arī satelītdatos – no Mērsraga līdz Mērsraga pilsētai piekrastē dominē akumulācijas procesi, vietām sasniedzot uzvirzīšanās ātrumu 4 m/gadā. Izteikto lagūnu krasts ievērojami apgrūtina satelītdatu pielietošanu krasta erozijas noteikšanā, tomēr, paredzams ka līdz pat zemesragam apmēram 5 km ziemeļu virzienā no Engures šajā posmā novērojama krasta akumulācija. Satelītu mērījumi norāda uz nelielu erozijas pārsvaru, vietām pat izteiktiem erozīviem procesiem, tomēr, šajā posmā, līdzīgi, kā, piemēram, Kolkas ragā, satelītdatiem nepieciešamas garākas mērījumu datu rindas, lai varētu precizēt morfoloģisko procesu īpatsvaru. Reģions apmēram 5 km attālumā ziemeļu virzienā no Engures raksturojams ar nelielu krasta atkāpšanos – vietām atkāpjoties ar ātrumu līdz 1,5 m/gadā.

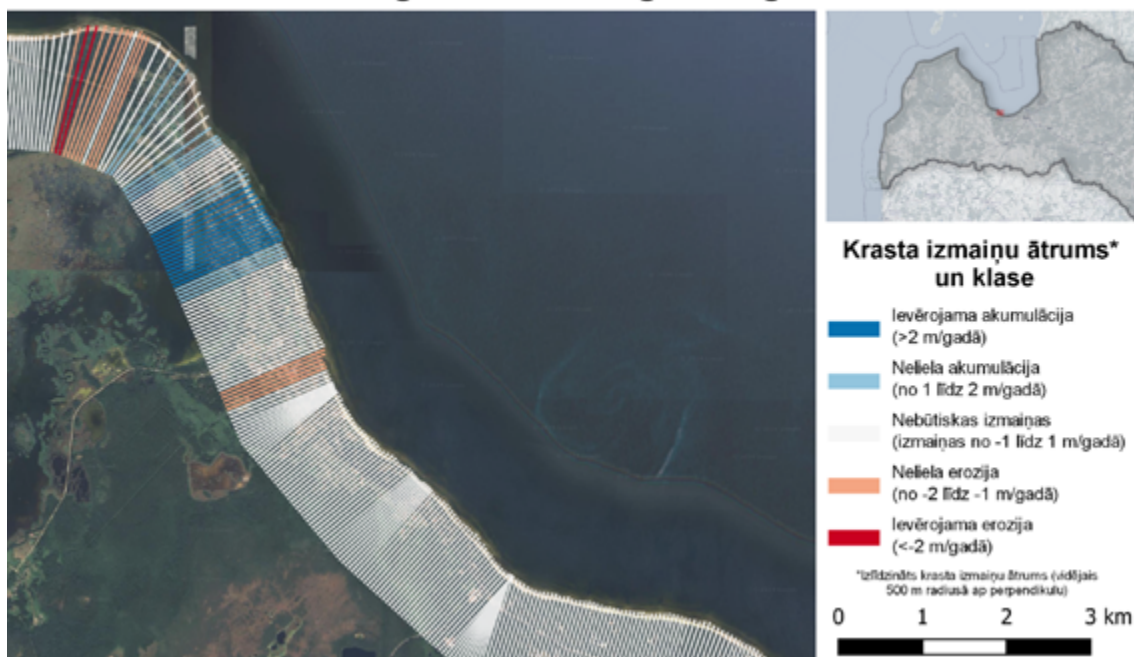
Engure - Ragaciems



27. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Engures līdz Ragaciemam

Gandrīz visā posmā no Engures līdz Ragaciemam (27. attēls) redzams, ka krasta saglabā līdzsvaru. Nelielā posmā pie Apšuciema novērojama krasta atkāpšanās ar ātrumu virs 1 m/gadā, tomēr pārējā posmā krasta līnija piecu gadu laikā nav būtiski mainījusies. Interesanta ir teritorija dienvidu virzienā no Engures ostas - šajā reģionā vēsturiski bijušas ievērojamas erozijas problēmas, ņemot vērā negatīvo iespaidu, kādu uz garkrasta straumēm atstāj Engures moli. Pēdējo piecu gadu laikā Engures pilsētā ir veikta pludmales infrastruktūras uzlabošana, kas redzams arī satelītdatos. Līdz ar to aprēķinātie rezultāti norāda, ka teritorijā notiek krasta akumulācija.

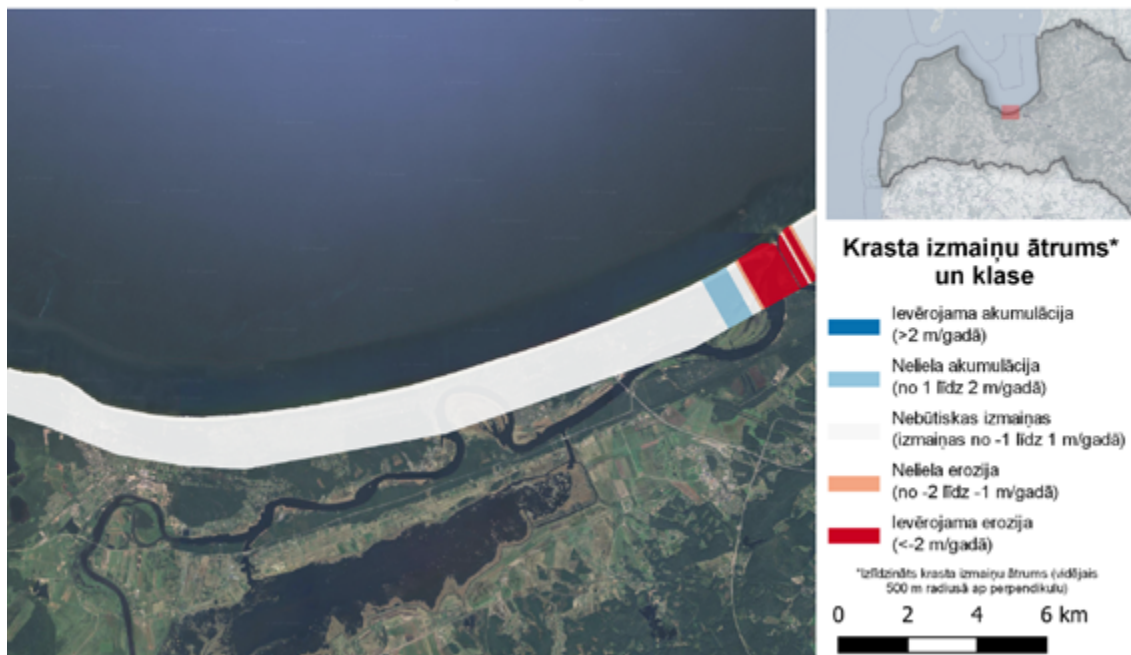
Ragaciems - Kauguru rags



28. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Ragaciema līdz Kauguru ragam

Interesantākās izmaiņas krasta posmā no Ragaciema līdz Kauguru ragam (28. attēls) ir saistītas ar Ragaciema zemesragu. Izteikti erozīvi procesi šajā posmā saistīti ar zemesraga rietumu daļu, kurā lokāli notiek krasta atkāpšanās ar ātrumu, kas lielāks par 2 m/gadā. Tomēr, līdzīgi kā Ovišu raga gadījumā, atkāpšanās tiek kompensēta raga otrā pusē, kur noskalotais sanešu materiāls tiek izgulsnēts Ragaciema apdzīvotās vietas piekrastē, krasta akumulācijas ātrumam vietām pārsniedzot 2 m/gadā. No Ragaciema dienvidaustrumu virzienā sākas viena no mierīgākajām Latvijas jūras piekrastes teritorijām.

Kauguru rags - Lielupe

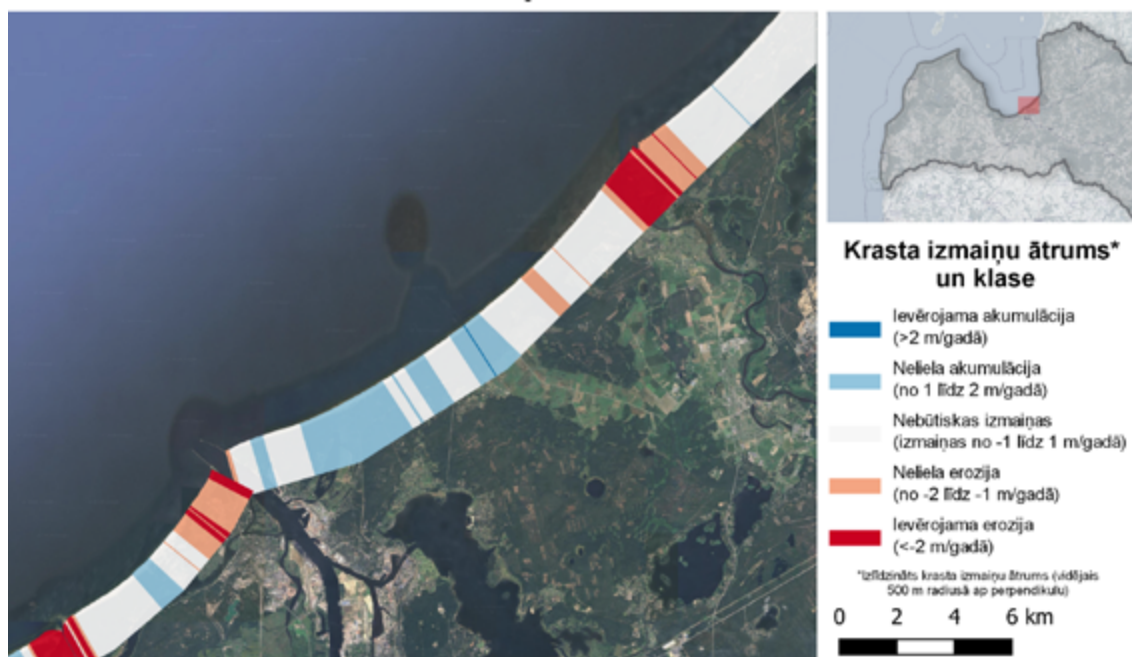


29. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Kauguru ragam līdz Lielupes ietekai jūrā

Kā jau minēts, Jūrmalas pilsētas teritorijā ilgtermiņā (29. attēls) novērojamas nelielas krasta izmaiņas. Šī mierīgā zona turpinās līdz pat Rīgas rietumu molam, un saistīta gan ar cilvēku saimniecisko un rekreatīvo darbību minētajās pludmalēs, gan garkrastu sanešu straumes virzienu un sanešu apjomu, kuru Rīgas līcim pieved Lielupe un Daugava.

Izteiktākie dinamiskie procesi šajā teritorijā saistīti ar Lielupes ieteku jūrā. Šajā teritorijā novērojama gan aktīvi fluviālie (upju darbības) procesi, gan izteikta zemūdens sēru un kāpu migrācija, kas šajā gadījumā satelītdatos atainojas kā erozīvi procesi. Tie šajā gadījumā nenorāda uz krasta eroziju, bet uz īpaši intensīvām pludmales izmaiņām, kuras piecu gadu laikā ir vairāk veicinājušas krasta atkāpšanos. Lai šo tendenci pārbaudītu un secinātu, vai posmā notiek krasta atkāpšanās, nepieciešams pagarināt monitoringa datu rindu garākā laika posmā.

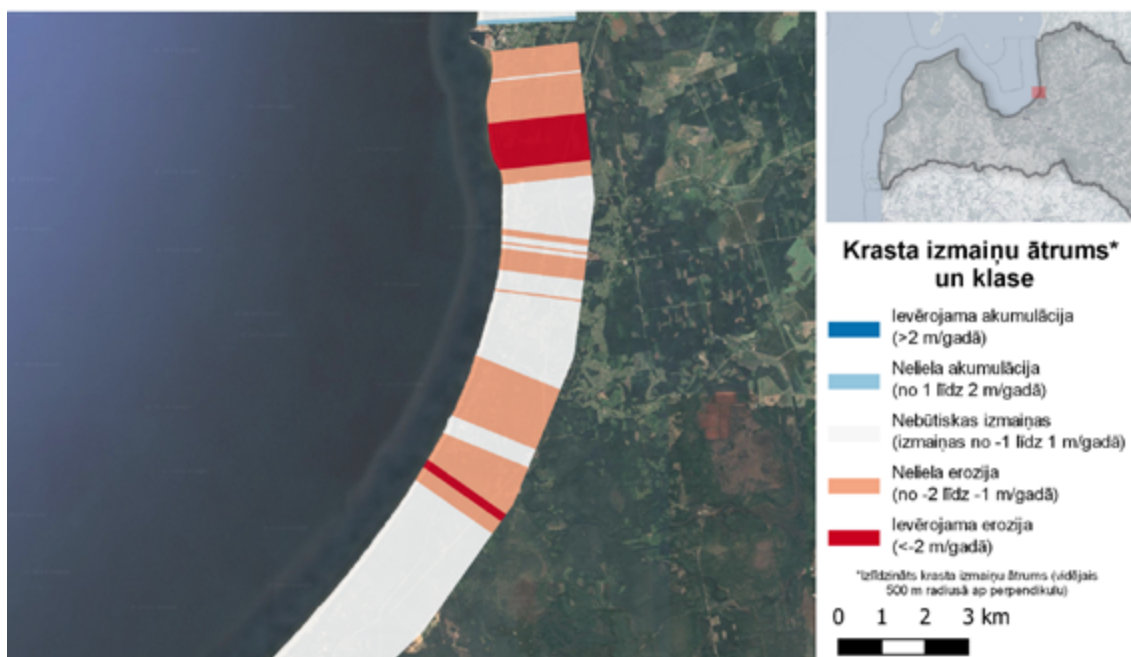
Lielupe - Lilaste



30. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Lielupes ietekai jūrā līdz Lilastei

Posmā no Lielupes ietekas jūra līdz Lilastei (30. attēls) atrodamas vairākas nozīmīgas vietas. Pludmales daļa austrumos no Lielupes ietekas jūrā ir relatīvi nemainīga, savukārt, tuvojoties Rīgas rietumu molam arvien izteiktāk ir redzamas krasta atkāpšanās pazīmes. Rītabuļļu pludmalē redzama neliela krasta uzvirzīšanās, nepārsniedzot 2 m/gadā, bet tuvāk molam Daugavgrīvā redzama intensīva krasta erozija, kur vietām atkāpšanās sasniedz pat 3 m/gadā. Rīgas mola otrā pusē, Mangaļsalā un Vecāķos redzams, ka dominē izteikti akumulatīvi procesi, kas domājams veidojušies mola ietekmes rezultātā. Sanešu akumulācija piekrastē turpinās līdz pat Garciemam, kur vērojama neliela krasta atkāpšanās ar ātrumu aptuveni 1,5 m/gadā. Intensīva krasta atkāpšanās novērojama arī pie Gaujas ietekas jūrā. Gan rietumu, gan austrumu ietekas pusēs redzamas krasta erozijas pazīmes. Lielākā krasta noskalošana notiek rietumu pusē, kur krasts atkāpjas ar ātrumu, kas ir lielāks nekā 3 m/gadā. Ziemeļaustrumos no Gaujas ietekas jūrā, Lilastes apkaimē, redzams, ka krasts ir līdzsvarā un būtiskas izmaiņas nav novērojamas.

Lilaste - Skultes osta

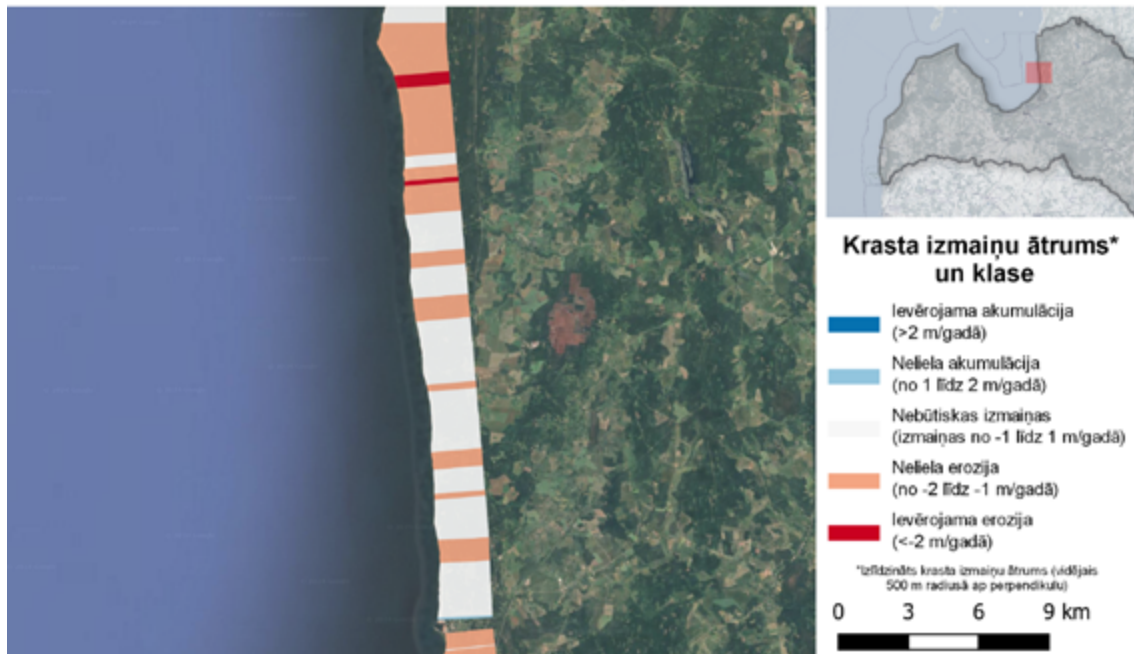


31. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Lilastes līdz Skultes ostai

Posms no Lilastes līdz Skultes ostai (31. attēls) raksturojams ar krasta erozijas procesiem. Reģiona dienvidu daļā, Lilastes apkaimē laika posmā no 2017. līdz 2022. gadam nav bijušas vērojamas izteiktas izmaiņas krasta līnijā. Virzoties uz ziemeļiem, izteikti erozijas procesi sākas piekrastes posmā pie Inčupes ietekas jūrā Saulkrastu dienvidu daļā pie Baltās kāpas. Krasta atkāpšanās ātrums šeit vietām nedaudz pārsniedz 2 m/gadā. Neliela krasta atkāpšanās turpinās Saulkrastu dienvidu daļā, savukārt pilsētas vidusdaļas piekrastē, krastam iegriežoties ziemeļu-dienvidu virzienā, krasta līnijā būtiskas izmaiņas nav novērotas. Saulkrastu ziemeļos arī vietām novērota neliela krasta atkāpšanās ar ātrumu 1,5 m/gadā.

Īpaši izteikta krasta atkāpšanās novērojama Zvejniekiema teritorijā un nedaudz dienvidu virzienā no tā. Nelielā zemesraga dienvidos, kurš iekļauj Zvejniekiema dienvidu daļu, krasta atkāpšanās ātrums sasniedz 1,5 m/gadā, savukārt Zvejniekiema teritorijā vietām krasta atkāpšanās pārsniedz 3 m/gadā. Arī Skultes ostas dienvidu daļā novērojama krasta atkāpšanās, bet ne tik intensīva kā Zvejniekiema dienvidu daļā, ar ātrumu aptuveni 1,5 m/gadā. Domājams, ka intensīvais erozijas ātrums Zvejniekiemā tieši saistīts ar Skultes ostas piekrastes būvēm – moliem, kuri ierobežo garkrasta sanešu plūsmas, veidojot sanešu deficītu pilsētas teritorijā.

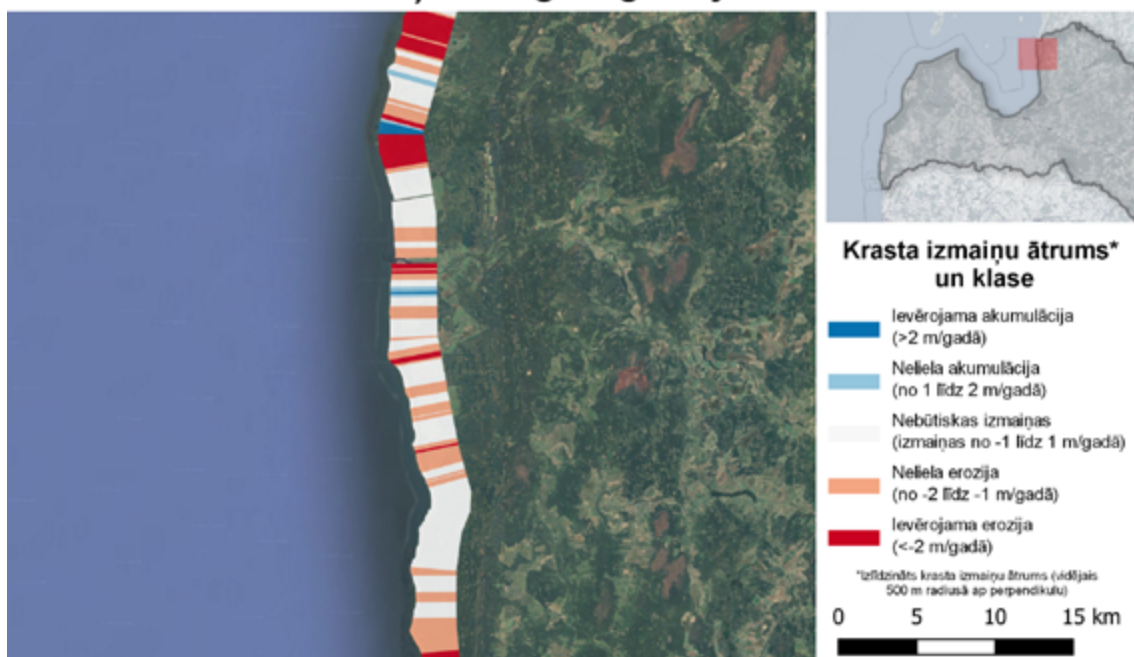
Skultes osta - Ķurmrags



32. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Skultes ostas līdz Ķurmragam

Rīgas līča austrumu piekrastes daļu raksturo izteikti erozijas procesi. Krasta vērsums ziemeļu-dienvidu virzienā pret valdošajiem austrumu-dienvidaustrumu vējiem veicina sanešu pārskalošanu ziemeļu virzienā, un, kamēr vietām krastā valda sanešu izskalošanās-izgulsnēšanās līdzsvars, kopumā vairāk izteikti ir erozīvi procesi. Skultes ostas ziemeļu daļā pie ziemeļu mola nelielā krasta nogrieznī (apmēram 500 m) dominē akumulācijas procesi, bet jau dažus kilometrus tālāk krasta periodiskos nelielos ragos un krasta ieliekumos redzami aktīvi erozijas procesi (32. attēls). To ātrums gan nav liels – līdz 1,5 m/gadā. Šāda nelielu erozijas un krasta līdzsvara posmu mija turpinās līdz pat Tūjai, kuras apkārtnē ir izteikti erozijas procesi, krastam atkāpjoties ar ātrumu aptuveni 2 m/gadā. Virzienā uz ziemeļiem no Tūjas turpinās erozijas procesi. Ķurmrags dienvidu daļā bijusi novērojama īpaši intensīva krasta atkāpšanās ar ātrumu, kurš pārsniedz 2 m/gadā, bet krasta noskalošanas procesi novērojami visā Ķurmrags apkārtnē.

Ķurmragi - Igaunija



33. attēls. Noteiktās krasta līnijas izmaiņas no Ķurmraga līdz Igaunijai

Ziemeļu virzienā no Ķurmraga līdz Igaunijas robežai turpinās izteikti erozijas procesi. Vidzemes akmeņainās jūrmalas apkārtnē labi redzams sanešu materiāla deficīts, kas atainojas vairākos krasta noskalošanas iecirkņos. Lai arī vēsturiski apkārtnē novērota erozija (Lapinskis un Grīne, 2014) laika posmā no 2017. līdz 2022. gadam Veczemju klintis nav būtiski atkāpušās iekšzemes virzienā. Ziemeļu virzienā pie Vitrupes ietekas jūrā un Šķisterciema, gan ir novērota krasta atkāpšanās, vietām ar ātrumu virs 2 m/gadā. Izteikti erozijas procesi iecirkņos turpinās līdz pat Svētciemam, pie kura novērota krasta atkāpšanās ar ātrumu 2 m/gadā.

Ziemeļu virzienā no Svētciema atrodami Ziemeļlatvijai raksturīgi, purvaini krasti, kuros vietām ir raksturīgas ļoti lēnas garkrasta sanešu plūsmas. Šādi krasti ir ierasti akumulatīvi – dienvidos no Salacgrīvas atrodami krasta iecirkņi ar izteikti dominējošiem akumulācijas procesiem. Tipiskajiem pārpurvotajiem lagūnu krastiem, kuri veidojās šajās teritorijās, krasta līnijas noteikšana ar satelītdatu palīdzību ir apgrūtināta – ņemot vērā, ka seklā ūdens apstākļos pat pie nelielām ūdens līmeņa izmaiņām krasts var pavirzīties vairākus desmitus metru uz priekšu. Līdz ar to, algoritma kļūdas rezultātā (vairāk aprakstīta un vizuāli redzama 34. attēlā), akumulatīvi krasti vietām var tikt interpretēti kā erozīvi, kā tas ir noticis Salacgrīvas dienvidu mola apkārtnē. Visdrīzāk, ka šajā teritorijā būtiskas izmaiņas krasta līnijā pēdējo piecu gadu laikā nav novērotas.

Uz ziemeļiem no Salacgrīvas ziemeļu mola ir izteikti redzami iecirkņi, kuros dominē krasta erozija. Eroziņas ātrums posmā no Salacgrīvas līdz pat Kuivižiem var sasniegt 1,5 m/gadā. Pie Kuivižu dienvidu mola, savukārt, būtiskas izmaiņas pēdējo piecu gadu laikā nav novērotas.

Virzoties ziemeļu virzienā no Kuivižiem atkal dominē zemie lagūnveida krasti – Randu pļavas. Jau iepriekšminēto iemeslu dēļ ir grūti spriest, vai novērotā

intensīvā erozija, kas atainota datos ir saistīta ar sistemātisku krasta atkāpšanos vai ikdienas ūdens līnijas mainību reģionā, bet teritorijā līdz pat Ainažu molam satelītdati ataino strauju krasta līnijas atkāpšanos, ar ātrumu pat virs 4 m/gadā. Domājams gan, ka šajā reģionā vairāk dominē akumulatīvi procesi, ņemot vērā lēnos straumes ātrumus, kā arī veģetāciju, kura bremsē garkrasta straumes un veicina mazāku daļiņu akumulāciju. Papildus monitoringa sistēmas mērījumi, kuri tiks ievākti nākotnē, varēs labāk raksturot situāciju šajā reģionā. Šo teritoriju neapdraud intensīvas erozijas riski – tie, drīzāk, parādītos tikai pieaugot jūras līmenim klimata pārmaiņu rezultātā.

Uz ziemeļiem no Salacgrīvas ziemeļu mola gan ir izteikti redzami iecirkņi, kuros dominē krasta erozija. Erozijas ātrums posmā no Salacgrīvas līdz pat Kuivižiem var sasniegt 1,5 m/gadā. Pie Kuivižu dienvidu mola, savukārt, būtiskas izmaiņas pēdējo piecu gadu laikā nav novērotas.

Virzoties ziemeļu virzienā no Kuivižiem atkal dominē zemie lagūnveida krasti – Randu pļavas. Jau iepriekšminēto iemeslu dēļ ir grūti spriest, vai novērotā intensīvā erozija, kas atainota datos saistāma ar sistemātisku krasta atkāpšanos vai ikdienas ūdens līnijas mainību reģionā, bet šajā teritorijā līdz pat Ainažu molam satelītdati ataino strauju krasta līnijas atkāpšanos, ar ātrumu pat virs 4 m/gadā. Domājams gan, ka šajā reģionā vairāk dominē akumulatīvi procesi, ņemot vērā lēnos straumes ātrumus, kā arī veģetāciju, kura bremsē garkrasta straumes un veicina mazāku daļiņu akumulāciju. Ilgāka termiņa pētījumi vai papildus monitoringa sistēmas mērījumi, kuri tiks ievākti nākotnē, varēs labāk raksturot situāciju šajā reģionā. Spriežams, ka šī un līdzīgas teritorijas neapdraud intensīvas erozijas riski - tie, drīzāk, parādītos tikai pieaugot jūras līmeņa kāpumam klimata pārmaiņu rezultātā.

4.3. Ūdens līniju verifikācija

Ūdens līniju verifikācijas rezultāti ir apkopoti 53. tabulā. Vidējā kļūda, salīdzinot ar bezpilota lidaparāta mērījumiem tika noteikta kā 3,18 m, Sentinel-2 ūdens līnijai sistemātiski atrodas vairāk sauszemes virzienā. Salīdzinājums ar Airbus Pléiades datiem norāda uz ievērojami mazāku vidējo kļūdu - 0,2 m. Līnijas nesakritības novērtēšanai labāks indikators ir vidējā kvadrātiskā kļūda, kas nosaka absolūto nesakritību starp Sentinel-2 datiem un verifikācijas datu kopām. Tā norāda uz 5,36 un 4,96 metru nesakritību starp Sentinel-2 un drona/Airbus Pléiades mērījumiem. Kļūdu sadalījuma analīze, apskatot noviržu 10. un 90. kvantili norāda uz nesakritībām, kuras ļoti reti bija mazākas par 0,6 m, vai lielākas par 8,68 m. Kā redzams, kļūdas vērtības ir ievērojami zemākas par Sentinel-2 pikseļa izšķirtspēju (10 m), kas norāda uz augstu metodes precizitāti.

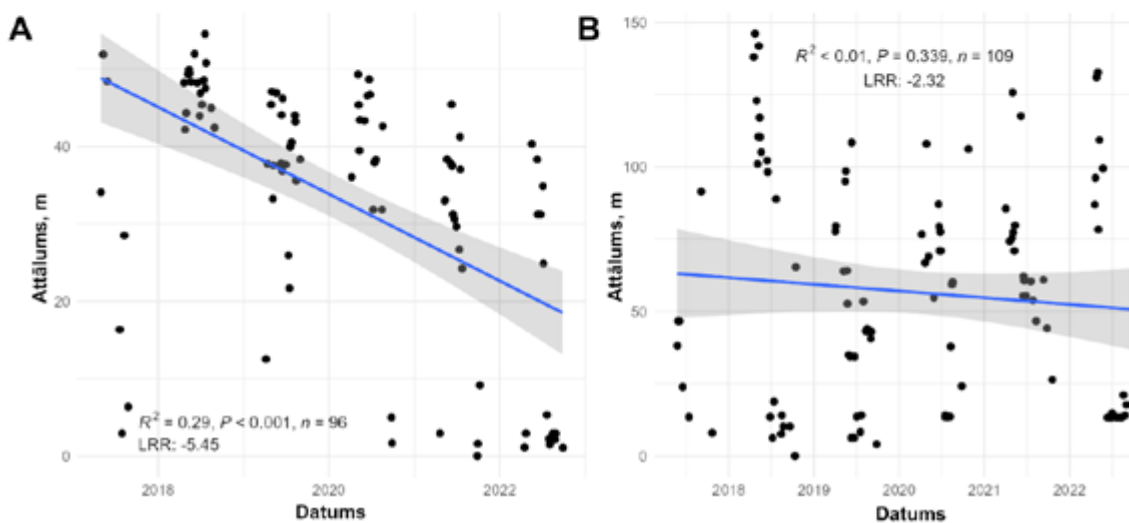
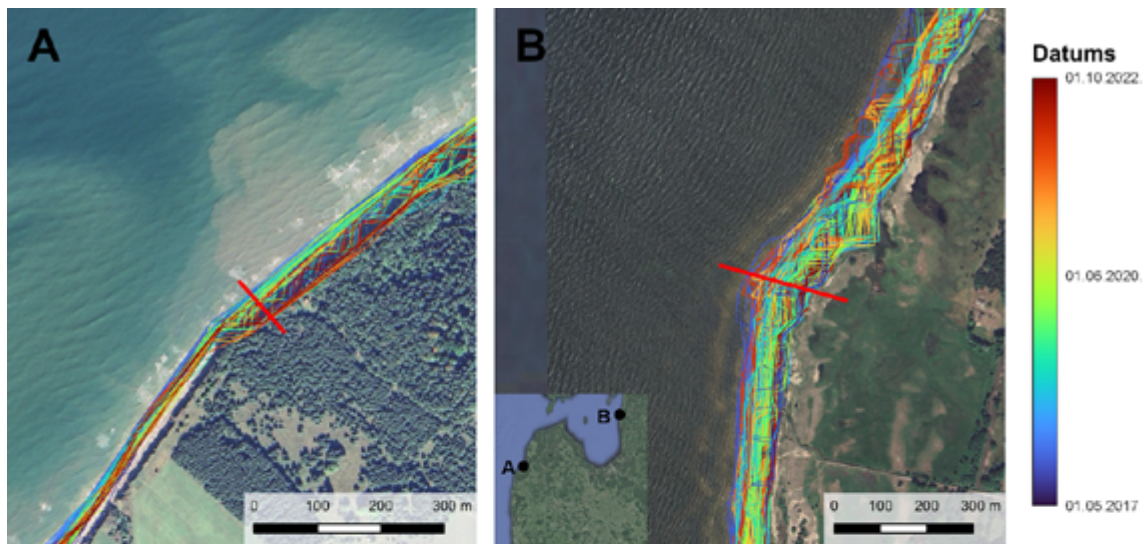
Sentinel-2 ūdens līniju salīdzinājums ar verifikācijas datu kopām

KĻŪDAS METRIKA	BEZPILOTA LIDAPARĀTA MĒRĪJUMI	AIRBUS PLÉIADES MĒRĪJUMI
Vidējā kļūda	3,18 m	0,20 m
Vidējā kvadrātiskā kļūda	5,36 m	4,96 m
10. / 90. kvantile	0,80 / 8,68 m	0,60 / 7,88 m

4.4. Rezultātu precizitātes novērtējums

Nemot vērā iegūtos verifikācijas rezultātus, uzskatāms, ka līdzšinējās krasta līnijas izmaiņas ir reprezentatīvas lielākajā daļā Latvijas teritorijas. Manuāla rezultātu kvalitātes kontrole, salīdzinot iegūtās ūdens līnijas gan ar atsevišķiem Sentinel-2 uzņēmumiem, gan augstas izšķirtspējas satelītdatiem un bezpilota lidaparātiem, gan iepriekšējiem pētījumiem no (Lapinskis un Grīne, 2014) norāda uz līdzīgiem iepriekšējo pētījumu rezultātiem lielākajā daļā Latvijas teritorijas. Neskatoties uz to, atsevišķās vietās attālināto datu interpretācija ir apgrūtināta pludmales ģeomorfoloģijas vai dinamisko piekrastes izmaiņu dēļ. Šīs raksturotas aprakstītas zemāk.

Vietām Latvijas piekrastē atrodamas izteikti plašas pludmales zemūdens nogāzes, kurās sekla ūdens apstākļos automātiska krasta līnijas klasifikācija ir problemātiska. Šādas teritorijas novērojamas Rīgas līča rietumu piekrastē, Mērsraga apkārtnē, kā arī Rīgas līča ziemeļu daļā. Vietām jūras līnijas klasifikāciju apgrūtinā koku mestās ēnas – šāda situācija novērojama atsevišķos apgabalos Kurzemes rietumu stāvkrasta apkārtnē. Koku ēnu radītais aptumšojums tiek nepareizi klasificēts kā sekls ūdens, raisot problēmas automātiskajās klasifikācijas funkcijās. Šīs algoritma darbības problēmas attēlotas 34. attēlā.



34. attēls. Krasta līnijas izmaiņas atsevišķās Latvijas pludmalēs, iezīmējot neprecizitātes krasta noteikšanas algoritmā. A - posms pie Labraga, B - posms uz ziemeļiem no Ainažiem. Katrs melnais punkts norāda uz krasta atrašanās vietu noteiktā datumā, sarkanās līnijas norāda perpendikulu atrašanās vietas. Pelēkā zona grafikos norāda 95% ticamības intervālu

Kļūdas krasta līnijas izmaiņu novērtējumā izraisa piekrastes daļas ar izteikti dinamiskiem procesiem, piemēram, Lielupes ieteka jūrā vai Kolkas raga apkārtnē. Šajos gadījumos īstermiņa izmaiņas, kas saistāmas ar atsevišķu sēkļu vai straumju veidošanos var būt ļoti lielas un maskēt ilgtermiņa krasta izmaiņu tendenci. Krasta izmaiņu precizēšanai šajās vietās nepieciešams ievākt satelītu mērījumus par ilgāku laika posmu.

Neskatoties uz minētajām problēmām, pētījuma ietvaros izstrādātā krasta izmaiņu analīze ir izmantojama gan piekrastes riska novērtēšanā, gan piekrastes teritorijas telpiskajā plānošanā. Apvienojot attālinātos novērojumus ar papildus piezemes mērījumiem, piemēram, nivelēšanas profilos, iespējams izstrādāt detalizētus krasta izmaiņu pielāgošanās plānus apdraudētajās teritorijās.

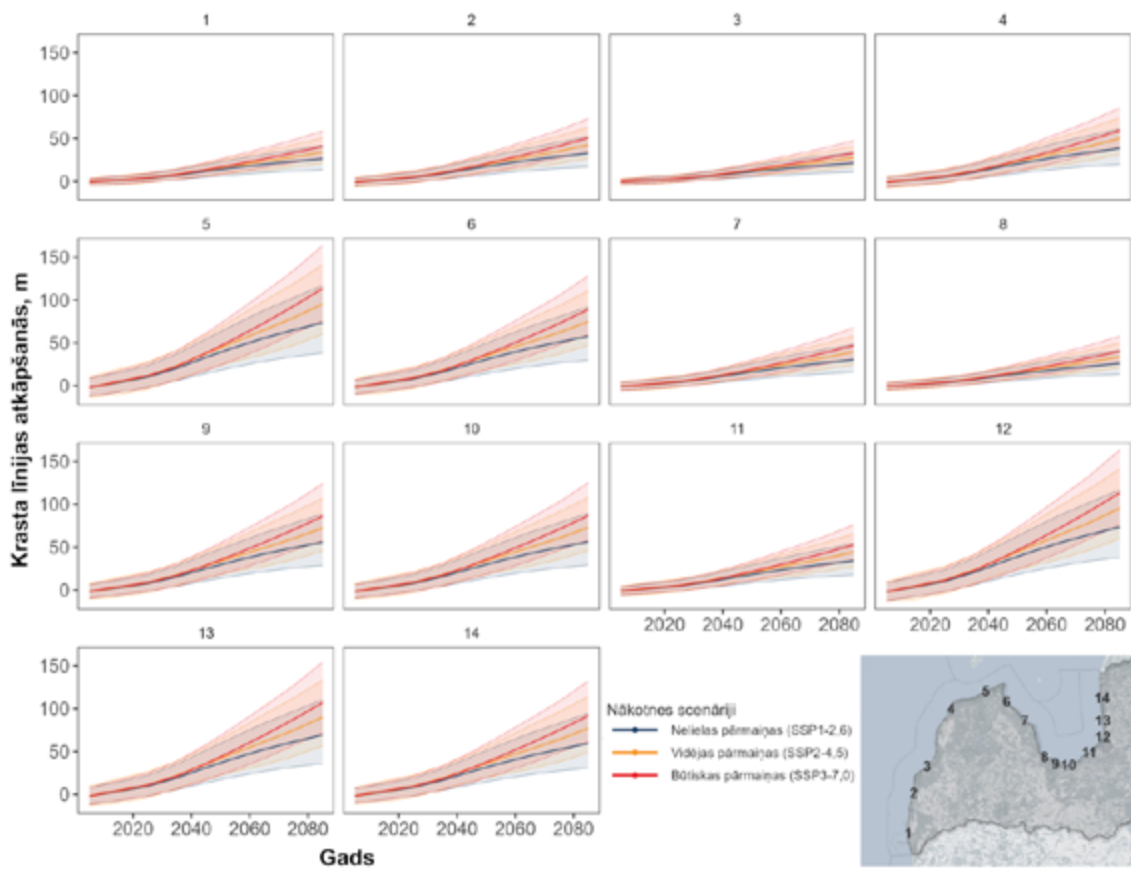
Pēc projekta noslēguma krasta līnijas monitoringu plānots turpināt, papildinot datu bāzi ar jaunāko informāciju par Latvijas piekrastes attīstību. Jauni satelītu mērījumi ļaus veidot precīzāku krasta izmaiņu novērtējumu ilgtermiņā.

4.5. Nākotnes riska novērtējums

Jaunākie pētījumi norāda, ka klimata pārmaiņu ietekmē jūras līmenis Latvijas teritorijā ir pieaudzis, kā arī turpinās pieaugt. Līdzšinējo datu analīze norāda uz relatīvi nelielu jūras līmeņa pieaugumu. Salīdzinot 1961.-1990. un 1991.-2020. gadu klimatiskās normas periodu vidējās vērtības, jūras līmenis Latvijā ir kāpis par aptuveni 1,5 cm. Ņemot vērā paredzamo klimata pārmaiņu paātrināšanos 21. gadsimtā paredzams, ka jūras līmeņa izmaiņas nākotnē būs straujākas. Atbilstoši klimata pārmaiņu scenārijiem, prognozēts, ka vidējais jūras līmenis Latvijas teritorijā līdz 2100. gadam varētu kāpt par 32,6-50,3 cm, attiecīgi nelielām un būtiskām klimata pārmaiņām.

Analizējot krasta izmaiņas nākotnē, ir būtiski uzsvērt, **ka nākotnes prognozes ir uzskatāmas par indikatīvām**. Ņemot vērā krasta procesu sarežģītību, precīzāku prognožu izveidei nepieciešami plašāki hidrodinamiskie sanešu plūsmu modeļi, kuri spētu labāk raksturot pludmaļu attīstību, ņemot vērā dažādus mainīgos faktorus piekrastēs – ūdens līmeņa izmaiņas, sanešu plūsmas un viļņu ietekmi, piekrastes veģetācijas ietekmi kā arī dažādus cilvēku īstenotos krasta aizsardzības pasākumus.

Ņemot vērā jūras līmeņa kāpuma prognozes, modelētās krasta izmaiņas 14 vietās Latvijā redzamas 35. attēlā 35. attēls. Ņemot vērā dažādus klimata pārmaiņu scenārijus, no nelielām līdz būtiskām klimata pārmaiņām, Latvijā līdz 2100. gadam tiek prognozēta vidējā krasta līnijas atkāpšanās intervālā no 47 līdz 72 metriem. **Būtiski, ka pilnīgi visi klimata pārmaiņu modeļi norāda uz krasta līnijas atkāpšanos** – atšķirīgs ir tikai prognozētais atkāpšanās apjoms. Dažādās Latvijas vietās paredzamas dažāda mēroga krasta izmaiņas – piemēram, pie būtiskām klimata pārmaiņām reģionā pie Saulkrastiem un Mazirbes prognozēta krasta līnijas atkāpšanās pat par 113 metriem (35. attēls 35. attēla 5. un 12. un grafiks), savukārt pie Klapkalnciema tā sasniegs tikai 40 metrus (35. attēls 35. attēla 8. grafiks). Krasta līnijas izmaiņas ievērojami ietekmē piekrastes zemūdens nogāzes un pludmales stāvums – līdz ar to vietās, kurās vēsturiski novērota erozija, ne vienmēr prognozētas lielākās izmaiņas nākotnē. Piemēram, stāvkrasts Jūrkalnes apkārtnē (35. attēls 35. attēla 3. grafiks) redzams kā apdraudēts, tomēr, ņemot vērā stāvo nogāzes leņķi un pludmales stāvkrastu, prognozēts, ka krasta līnijas izmaiņas nākotnē varētu sasniegt 21-33 m, atbilstoši nelielām un būtiskām klimata pārmaiņām.



35. attēls. Modelētās krasta līnijas izmaiņas vairākās Latvijas vietās. Ar krāsām attēloti dažādi klimata pārmaiņu scenāriji un 90% ticamības intervāls

SECINĀJUMI UN APKOPOJUMS

Pētījuma ietvaros izstrādāta jauna, attālinātajos novērojumos balstīta metodika Latvijas jūras piekrastes izmaiņu monitoringam. Metode balstīta uz Eiropas kosmosa aģentūras Zemes novērošanas misijā Sentinel-2 iegūtajiem datiem, saņemot jaunu informāciju par Latvijas jūras robežu ar sauszemi gada siltajā sezonā ar atkārtotās biežumu vidēji reizi piecās dienās. Izstrādātā metodika pielietota arī pagātnes krasta līnijas izmaiņu novērtējumam, raksturojot situāciju Latvijas piekrastē no 2017. līdz 2022. gadam. Metodes precizitāte pārbaudīta ar augstas izšķirtspējas bezpilota lidaparātu un komerciālo satelītu Airbus Pléiades mērījumiem Latvijas Baltijas jūras dienvidu piekrastē. Vidējā metodes kļūda krasta līnijas noteikšanā ir 4,96-5,36 m, kas ir ievērojami mazāka kā Sentinel-2 izšķirtspēja, liecinot, ka pētījumā iegūtie dati var tikt veiksmīgi izmantoti ilgtermiņa krasta izmaiņu pētījumos.

Laika posmā no 2017. līdz 2022. gadam Latvijas piekrastē pārsvarā novērojami erozijas procesi. Vairāk kā 55% Latvijas piekrastes teritorijā, 270 km garumā, novērojama krasta atkāpšanās, ar vidējo atkāpšanās ātrumu 1,46 m/gadā. Atlikušajā piekrastē, vairāk kā 220 km garumā, novērojama krasta uzskalošana ar vidējo ātrumu 1,41 m/gadā. Lielākajā daļā Latvijas pludmaļu novērojamas nelielas krasta izmaiņas, ar ātrumiem zemākiem par ± 2 m/gadā. Īpaši straujas izmaiņas, ar ātrumu virs 5 m/gadā, Latvijas piekrastē novērojamas tikai 13 km garumā, no kuriem 7 km vērojama strauja krasta atkāpšanās, savukārt 6 km – krasta uzvirzīšanās.

Analizētās līdzšinējas krasta izmaiņas projekta ietvaros aptver tikai piecu gadu periodu, kas ir par īsu, lai pilnvērtīgi raksturotu ilgtermiņa izmaiņas dinamiskākajās piekrastes teritorijās – upju grīvās un zemesragos. Pēc projekta noslēguma krasta izmaiņu monitorings tiks turpināts, papildinot rezultātus gan ar 2015. un 2016. gada datiem, gan jaunākajiem ikgadējiem mērījumiem. Jaunākie dati par piekrastes izmaiņām, kā arī atjaunotajiem krasta izmaiņu ātrumiem ir pieejami interaktīvā formā klimata pārmaiņu analīzes rīkā (https://klimats.meteo.lv/klimats_latvija/klimata_riks/).

Pamatojoties uz klimata pārmaiņu starpvaldības padomes (IPCC) 6. ziņojumu pētījuma ietvaros izstrādātas indikatīvas nākotnes jūras līmeņa izmaiņu un krasta līnijas atkāpšanās prognozes Latvijas teritorijai. Paredzams, ka līdz 2100. gadam jūras līmenis Latvijas ekonomiskajā zonā pieaugs no 20,6 cm 1991.-2020. gada klimatiskās normas periodā līdz 32,6-50,3 cm, ja klimata pārmaiņas būs nelielas vai būtiskas. Nelielu klimata pārmaiņu scenārijā 2100. gadā Latvijas piekraste varētu atkāpties par vidēji 47 m, vidēju klimata pārmaiņu scenārijā par 61 m un būtisku klimata pārmaiņu scenārijā par 72 m. Ņemot vērā komplekso faktoru kopumu, kas ietekmē piekrastes dinamikas izmaiņas, precīzāku nākotnes prognožu izstrādei nepieciešams veidot augsta līmeņa starpdisciplinārus krasta attīstības modeļus, kuri iekļautu arī garkrasta sanešu plūsmu, ekoloģiskos un sociāli-ekonomiskos piekrastes zonas aizsardzības faktorus. Līdz ar to, šajā pētījumā izstrādātās nākotnes krasta atkāpšanās prognozes uzskatāmas par indikatīvām.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

Airbus. (2024). Pléiades | Very High-Resolution (50cm) Satellites Imagery. <https://intelligence.airbus.com/imagery/our-optical-and-radar-satellite-imagery/pleiades/>

Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88(1), 117–130. <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000252>

Buono, A., Nunziata, F., Mascolo, L., & Migliaccio, M. (2014). A Multipolarization Analysis of Coastline Extraction Using X-Band COSMO-SkyMed SAR Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7), 2811–2820. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2320366>

Canny, J. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>

Copernicus. (2023, November 13). Copernicus Data Space Ecosystem | Europe's eyes on Earth. <https://dataspace.copernicus.eu/>

Dong, P. (1997). Implementation of mathematical morphological operations for spatial data processing. *Computers & Geosciences*, 23(1), 103–107. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(96\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00065-9)

Douglas, D. H., & Peucker, T. K. (1973). ALGORITHMS FOR THE REDUCTION OF THE NUMBER OF POINTS REQUIRED TO REPRESENT A DIGITIZED LINE OR ITS CARICATURE. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 10(2), 112–122. <https://doi.org/10.3138/FM57-6770-U75U-7727>

Eberhards, G. (2003.) *Latvijas jūras krasti*. Latvijas Universitāte, Rīga, 259 lpp.

Erdem, F., Bayram, B., Bakirman, T., Bayrak, O. C., & Akpınar, B. (2021). An ensemble deep learning based shoreline segmentation approach (WaterNet) from Landsat 8 OLI images. *Advances in Space Research*, 67(3), 964–974. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.043>

European Space Agency. (2023, June 20). Sentinel-2—Missions—Sentinel Online. Sentinel Online. <https://copernicus.eu/missions/sentinel-2>

Forgy, E. (1965). Cluster Analysis of Multivariate Data: Efficiency versus Interpretability of Classifications. *Biometrics*, 21, 768–780.

Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Grinbergs, E., (1957) *Pozdnyelednikovaya i poslednednikovaya istoriya poberezhya Latvīskoi SSR*. Izdatelstvo Akademii Nauk LSSR, Rīga, 122 s

- Grewingk, K., (1861) Geologie von Liv- und Kurland mit Inbegriff einiger angrenzenden Gebiete. Dorpart. Serie 1, 2, S. 479–776.
- Himmelstoss, E., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2021). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide. In Open-File Report (2021–1091). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
- Hooke, J. M. (1979). An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology*, 42(1–2), 39–62. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90005-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90005-2)
- Kennedy, R. E., & Cohen, W. B. (2003). Automated designation of tie-points for image-to-image coregistration. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17), 3467–3490. <https://doi.org/10.1080/0143116021000024249>
- Konstantinou, A., Scott, T., Masselink, G., Stokes, K., Conley, D., & Castelle, B. (2023). Satellite-based shoreline detection along high-energy macrotidal coasts and influence of beach state. *Marine Geology*, 462, 107082. <https://doi.org/10.1016/j.mar-geo.2023.107082>
- Kopp, R. E., Oppenheimer, M., O'Reilly, J. L., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Fox-Kemper, B., Garner, G. G., Golledge, N. R., Hermans, T. H. J., Hewitt, H. T., Horton, B. P., Krinner, G., Notz, D., Nowicki, S., Palmer, M. D., Slangen, A. B. A., & Xiao, C. (2023). Communicating future sea-level rise uncertainty and ambiguity to assessment users. *Nature Climate Change*, 13(7), 648–660. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01691-8>
- Knaps, R. (1938) Prufung der Formel von prof. Munch-Petersen über Materialwanderung an der lettischen Küste. VI Baltische Hydrologische Konferenz. Bericht, Berlin, S. 60.
- Lapinskis, J., & Grīne, I. (2014). Vadlīnijas jūras krasta erozijas seku mazināšanai (Guidelines KPR 2013/12/EU43084; p. 97). University of Latvia. https://www.varam.gov.lv/sites/varam/files/content/files/vadinijas_juras_krasta_erozijas_seku_mazinasanai.pdf
- Liu, C., Xiao, Y., & Yang, J. (2017). A Coastline Detection Method in Polarimetric SAR Images Mixing the Region-Based and Edge-Based Active Contour Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7), 3735–3747. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2679112>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8(1), 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- LVĢMC (2024). Līdzšinējās un nākotnes klimata pārmaiņas Latvijā. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, Rīga.
- Manaf, S. A., Mustapha, N., Sulaiman, Md. N., Husin, N. A., & Hamid, M. R. A. (2018). Artificial Neural Networks for Satellite Image Classification of Shoreline Extraction for Land and Water Classes of the North West Coast of Peninsular Malaysia. *Advanced Science Letters*, 24(2), 1382–1387. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.10754>
- McAllister, E., Payo, A., Novellino, A., Dolphin, T., & Medina-Lopez, E. (2022). Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, 174, 104102. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104102>
- Modava, M., Akbarizadeh, G., & Soroosh, M. (2019). Integration of Spectral Histogram

- and Level Set for Coastline Detection in SAR Images. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55(2), 810–819. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2865120>
- NASA. (2024). Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Nunziata, F., Buono, A., Migliaccio, M., & Benassai, G. (2016). Dual-Polarimetric C- and X-Band SAR Data for Coastline Extraction. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(11), 4921–4928. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2560342>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Ouyang, Y., Chong, J., & Wu, Y. (2010). Two coastline detection methods in Synthetic Aperture Radar imagery based on Level Set Algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 31(17–18), 4957–4968. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.485142>
- Revelis, P., (1938) Materialwanderung an der Lettischen Küste. VI Baltische Hydrologische konferenz. Bericht, Berlin. S. 22-35.
- Rubin, J. (1967). Optimal Classification into Groups: An Approach for Solving the Taxonomy Problem. *15*, 103–144.
- Scheffler, D., Hollstein, A., Diedrich, H., Segl, K., & Hostert, P. (2017). AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data. *Remote Sensing*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/rs9070676>
- Schwartz, M. L. (1967). The Bruun Theory of Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *The Journal of Geology*, 75(1), 76–92. <https://doi.org/10.1086/62723>
- Stakle, P. (1936.) Ūdenslīmeņa, jūras straumju un sanešu kustības novērojumi Latvijas piekrastē 1929–1933. Finanču ministrija, Jūrniecības departaments, 133. lpp.
- Ulsts, V. (1998.) Baltijas jūras Latvijas krasta zona. Valsts Ģeoloģijas Dienests, Rīga, 96 lpp.
- Ulst, V. (1961) K voprosu o zakonamernostyah razvy`tya eolovoy akumulacii na morskome beregu. *Morskoye berega. Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, Moskva*, pp. 93-100.
- Van Der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J. D., Yager, N., Gouillart, E., & Yu, T. (2014). scikit-image: Image processing in Python. *PeerJ*, 2, e453. <https://doi.org/10.7717/peerj.453>
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2018). Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sensing of Environment*, 216, 586–597. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015>
- Veinbergs, I., Danilans, I. (1992) Evolycija sovremmenogo morskogo berega Latviy. *Evolycija beregov v uslovijah podnyatya urovnya okeana. Nauka, Moskva*, s 116-121.
- Viaña-Borja, S. P., Fernández-Mora, A., Stumpf, R. P., Navarro, G., & Caballero, I. (2023). Semi-automated bathymetry using Sentinel-2 for coastal monitoring in the Western Mediterranean. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103328>

Vitousek, S., Buscombe, D., Vos, K., Barnard, P. L., Ritchie, A. C., & Warrick, J. A. (2023). The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e10. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.4>

Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>

Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(3), 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>

Yang, L., & Cervone, G. (2019). Analysis of remote sensing imagery for disaster assessment using deep learning: A case study of flooding event. *Soft Computing*, 23(24), 13393–13408. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03878-8>

Zupanc, A. (2020, July 3). Improving Cloud Detection with Machine Learning. *Sentinel Hub Blog*. <https://medium.com/sentinel-hub/improving-cloud-detection-with-machine-learning-c09dc5d7cf13>



LVĢMC

RĪGA, 2024