

DISERTATIONES GEOLOGICAE UNIVERSITATIS LATVIENSIS  
Nr. 29

**JĀNIS KARUŠS**

**RADIOLOKĀCIJAS METODES IZMANTOŠANA  
PURVU NOGULUMU PĒTĪJUMOS**

**PROMOCIJAS DARBS**

doktora grāda iegūšanai ģeoloģijas nozares  
lietišķās ģeoloģijas apakšnozarē

LATVIJAS UNIVERSITĀTE

Promocijas darbs izstrādāts:

Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nodaļas Lietišķās ģeoloģijas katedrā no 2012. gada līdz 2015. gadam



Promocijas darba vadītājs:

**Valdis Segliņš**, profesors, *Dr. geol.* (Latvijas Universitāte)

Recenzenti:

**Juris Soms**, *Dr. geol.*, Daugavpils Universitāte

**Jānis Spīgulis**, profesors, *Dr. habil. phys.*, Latvijas Universitāte

**Petras Šinkūnas**, profesors, *Dr.*, Viļņas Universitāte (Lietuva)

Promocijas padomes sastāvs:

**Vitālijs Zelčs**, profesors, *Dr. geol.* – padomes priekšsēdētājs

**Ervīns Lukševičs**, profesors, *Dr. geol.*

**Laimdota Kalniņa**, asociētā profesore, *Dr. geogr.*

**Ģirts Stinkulis**, asociētais profesors, *Dr. geol.*

**Valdis Segliņš**, profesors, *Dr. geol.*

Padomes sekretārs:

**Ģirts Stinkulis**, asociētais profesors, *Dr. geol.*

Promocijas darbs pieņemts aizstāvēšanai ar LU Ģeoloģijas promocijas padomes 2015. gada 14. maija sēdes lēmumu nr. 2/2015.

Promocijas darba atklāta aizstāvēšana notiks LU Ģeoloģijas promocijas padomes sēdē 2015. gada 25. augustā Rīgā, Alberta ielā 10, Jāņa un Elfrīdas Rutku auditorijā (313. telpa).

Promocijas darba kopsavilkuma izdošanu ir finansējusi Latvijas Universitāte.

Ar promocijas darbu ir iespējams iepazīties Latvijas Universitātes Zinātniskajā bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4 un Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā Rīgā, Lielvārdes ielā 4.

Atsauksmes sūtīt: Dr. Ģirts Stinkulis, Latvijas Universitātes Ģeoloģijas nodaļa, Raiņa bulvāris 19, LV-1586, Rīga. Fakss: +371 6733 2704, e-pasts: [Girts.Stinkulis@lu.lv](mailto:Girts.Stinkulis@lu.lv)

© Jānis Karušs, 2015  
Latvijas Universitāte, 2015

## Anotācija

Promocijas darbs ir veltīts ģeoradara izmantošanas iespēju izziņai purvu pētījumos. Pētījuma gaitā iegūti oriģināli rezultāti, kuri saturiskā ziņā papildina zināšanas par radiolokācijas metodes izmantošanas iespējām, gan arī tās sasaisti ar tradicionālām purvu nogulumu pētījumu metodēm.

Pētījumā secināts, ka visus purvos iegūtos ģeoradara signāla atstarojumus nevar skaidrot tikai ar šo slāņu mitruma atšķirībām. Pētījumi augstā tipa purvos apliecina, ka ģeoradara signāla atstarojumu var izraisīt arī kūdras botāniskā sastāva izmaiņas vai kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas.

Veiktais pētījums ļauj ieskicēt turpmākos pētniecības virzienus, kurus attīstot būtu iespējams kvantitatīvi prognozēt no kādas slāņu robežas ir iespējama ģeoradara signāla atstarojuma izveidošanās.

**Raksturvārdi:** Ģeoradars, kūdras nogulumu pētījumi, ģeoradara datu interpretācija, kūdras īpašības, kūdras elektromagnētiskās īpašības

## **Abstract**

The doctoral thesis “Application of ground-penetrating radar in bog deposit research” is dedicated to the analysis of possible applications of ground-penetrating radars in bog research. During the research, original results were obtained which complement the existing knowledge about ground-penetrating radar application possibilities, as well as its link to conventional bog deposit research methods.

It was concluded that the obtained reflections of ground-penetrating radar signals, from all of the bogs researched, are not explainable solely due to the peat moisture content changes. Research of the bogs confirms that reflections of ground-penetrating radar signals can be caused by changes of the peats botanical composition, and the degree of decomposition.

The conducted research outlines fields for future research that must be expanded upon in order to develop ground-penetrating radar methods.

**Keywords:** ground-penetrating radar (GPR), studies of peat deposits, GPR data interpretation, properties of peat, electromagnetic properties of peat

# Saturs

Anotācija .....	3
Abstract .....	4
Ievads .....	7
1. Radiolokācijas metode un tās raksturojums.....	14
1.1. Elektromagnētiskie viļņi.....	14
1.1.1. Elektromagnētisko viļņu izplatīšanās dielektriķos.....	15
1.1.2. Dielektriskā caurlaidība .....	18
1.1.3. Impulsa izplatīšanās dielektriķī.....	19
1.1.4. Elektromagnētisko viļņu atstarošanās no robežvirsmām .....	21
1.2. Ģeoradara darbības principi .....	22
1.2.1. Radiolokācijas metodes pirmsākumi un attīstības vēsture.....	22
1.2.2. Ģeoloģiskos pētījumos izmantotie ģeoradari .....	24
1.2.3. Iegūto rezultātu telpiskā izšķirtspēja.....	26
1.2.4. Radiolokācijas mērījumu veikšanas paņēmieni .....	28
1.2.5. Ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšana.....	28
1.3. Radiolokācijas pētījumi purvos .....	32
1.3.1. Purvos īstenoto radiolokācijas pētījumu metodikas apskats .....	33
1.3.2. Purvos īstenoto radiolokācijas pētījumu rezultātu apskats.....	37
2. Materiāli un metodes .....	42
2.1. Ģeofizikālo datu korelācija ar purvu nogulumu īpašībām .....	42
2.2. Pētījuma objektu izvēle un radiolokācijas profilu novietojums .....	42
2.3. Radiolokācijas pētījumi .....	45
2.3.1. Sniega segas ietekme uz iegūtajiem rezultātiem .....	45
2.3.2. Pētījuma gaitā izmantotais ģeoradars un antenu sistēmas.....	47
2.3.3. Radiolokācijas mērījumu veikšana .....	49
2.3.4. Ierakstīto radarogrammu apstrāde.....	50
2.3.5. Laika ass korekcija .....	51
2.3.6. Radiolokācijas datu attēlošana un analīze, izmantojot izklājlapu un datu statistiskās apstrādes datorprogrammas .....	54
2.3.7. Dziļuma, no kura saņemts atstarojums, noteikšana .....	55
2.3.8. Laika, pēc kura saņemts radiolokācijas signāla atstarojums, noteikšana.....	57
2.3.9. Ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma nogulumu slāņos noteikšana.....	57
2.3.10. Dziļuma intervāla metode .....	59
2.4. Ģeoloģiskie pētījumi .....	63
2.4.1. Urbumu novietojums.....	63
2.4.2. Urbumu ierīkošana .....	64
2.4.3. Laboratorijas analīzes.....	64
2.5. Kartogrāfisko materiālu sagatavošana un datu apstrāde .....	65
3. Pētījumu teritorijas raksturojums.....	66
3.1. Cenas tīrelis .....	66
3.2. Dzelves purvs .....	67
3.3. Makinu purvs.....	68
3.4. Laugas purvs.....	69
3.5. Raganu purvs .....	70
4. Rezultāti un interpretācija .....	72
4.1. Cenas tīrelis .....	72
4.1.1. Radiolokācijas mērījumi .....	72
4.1.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija.....	80

4.2. Dzelves purvs .....	86
4.2.1. Radiolokācijas mērījumi .....	86
4.2.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija.....	89
4.3. Makīnu purvs.....	91
4.3.1. Radiolokācijas mērījumi .....	91
4.3.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija.....	94
4.4. Laugas purvs.....	97
4.4.1. Radiolokācijas mērījumi .....	97
4.4.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija.....	100
4.5. Raganu purvs .....	104
4.5.1. Radiolokācijas mērījumi .....	104
4.5.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija.....	106
5. Diskusija .....	108
5.1. Purvu pētījumos pielietoto radiolokācijas pētījumu metodikas aspekti .....	108
5.2. Radiolokācijas mērījumu interpretācijas jautājumi .....	112
5.3. Radiolokācijas metodi aprakstošie termini.....	120
Secinājumi .....	122
Literatūras saraksts .....	124

# Ievads

## Pētījuma aktualitāte

Purvu nogulumu zinātniskie pētījumi tiek veikti visā pasaulē, un to mērķi ir visai atšķirīgi. Tā tiek veikti gan pētījumi ar mērķi izzināt dabas vēsturi (Castro et al., 2015; Pratte et al., 2013; Eckstein et al., 2009), gan pētījumi, kas saistāmi ar kūdras praktisko pielietojumu meklējumiem (Zhou et al., 2012; Cojocar et al., 2011; Botero et al., 2010). Šajos pētījumos vairumā gadījumu ir nepieciešams noteikt kūdras fizikālās īpašības un to sadalījumu purva ģeoloģiskajā griezumā.

Tradicionāli informācija par purva ģeoloģisko uzbūvi tiek iegūta, izmantojot ierīkoto urbumu datus. Taču informācijas daudzums par kūdras īpašību sadalījumu purva griezumā, ko var iegūt, izmantojot ģeoloģiskos urbumus, šurpus vai grāvjus, raksturo tikai atsevišķus punktus purvā. Tādējādi, veicot mūsdienīgus pētījumus, kuros prasības pēc iegūto datu apjoma un precizitātes pakāpeniski pieaug, šāda veida mērījumu sniegtais informācijas daudzums nav pietiekošs.

Ņemot vērā to, ka urbumu ierīkošana ir fiziski smags, salīdzinoši laikietilpīgs un sarežģīts process, arvien mazāka attāluma noteikšana starp atsevišķiem urbumiem nav uzskatāma par risinājumu centienos iegūt detalizētāku informāciju par purva ģeoloģisko uzbūvi.

Iepriekš minētais nosaka nepieciešamību attīstīt netiešās pētījumu metodes, ar kuru palīdzību būtu iespējama ātra un efektīva liela datu apjoma iegūšana par pētīto purvu uzbūvi un to veidojošās kūdras īpašību sadalījumu ģeoloģiskajā griezumā.

Ņemot vērā to, ka jau pēc pirmajiem mēģinājumiem pielietot radiolokācijas metodi purvu nogulumu pētījumos, tika konstatēts, ka, to izmantojot, ir iespējams iegūt detalizētu informāciju gan par purva biezumu, gan kūdras īpašību sadalījumu purva ģeoloģiskajā griezumā (Bogorobskiy, Trepov, 1979; Finkel'shteyn, et al., 1977), tika pieņemts, ka radiolokācijas metode var tikt izmantota purvu pētījumos. Turpmākie pētījumi minēto apstiprināja, jo īpaši attiecībā uz augstas detalizācijas pētījumiem. Kā galvenās radiolokācijas metodes priekšrocības jāmin iespējas salīdzinoši īsā laikā veikt mērījumus plašā teritorijā, kā arī veikto mērījumu detalitāte. Tas ir, veicot radiolokācijas zondēšanu pa izvēlēto radiolokācijas profilu, atsevišķi mērījumi var tikt veikti ar savstarpējo attālumu, kas nepārsniedz piecus centimetrus (Zolotarev, 2007). Minētais ļauj uzskatīt, ka ierakstītā radarogramma ataino praktiski nepārtrauktu purva ģeoloģisko griezumumu visā tā garumā, kas ļauj ar augstu detalitāti izsekot iegulu veidojošos atsevišķos slāņus dziļumā un pa laterāli.

Iepriekš minētais liecina, ka radiolokācijas metodes pielietošana purvu nogulumu pētījumos var tikt uzskatīta par piemērotu risinājumu nepieciešamībai pēc detalizētākas informācijas par purvu veidojošās kūdras īpašību sadalījumu purva ģeoloģiskajā griezumā (Jol, 2009).

Tomēr vēl arvien nav atrisināti vairāki ar radiolokācijas metodes pielietošanu saistāmi jautājumi, kas neļauj to izmantot kā standarta metodi purvu nogulumu pētījumos.

Tā, piemēram, neskatoties uz to, ka radiolokācijas metode purvu nogulumu pētījumos tiek izmantota jau vairāk kā 30 gadus (Bogorobskiy, Trepov, 1979), standartizēta lauka darbu un iegūto mērījumu interpretācijas metodika vēl joprojām nav izstrādāta. Tāpat vēl arvien nav izstrādāti teorētiski matemātiski modeļi, ar kuru palīdzību būtu iespējams prognozēt to, vai konkrētas purvu nogulumu slāņu robežas var izraisīt ģeoradara signāla atstarojumu. Minētais būtiski ierobežo radiolokācijas metodes attīstību un iespējas to praktiski pielietot purvu nogulumu pētījumos.

Tādējādi būtiski ir veikt pētījumus, kuru mērķis ir izstrādāt iespējami efektīvāku radiolokācijas mērījumu, kas tiek pielietoti purvu pētījumos, veikšanas, apstrādes un interpretācijas metodiku. Tāpat par mazsvarīgiem nevar tikt uzskatīti jautājumi, kas saistāmi ar iegūto radiolokācijas mērījumu sasaisti ar purva ģeoloģisko griezumumu un iegūto mērījumu prezentāciju.

Kā arī ir nepieciešams veikt fundamentālus pētījumus, kuru mērķis ir identificēt tās purvu nogulumu fizikālās īpašības, kas ietekmē purvu elektromagnētiskās īpašības un var izraisīt ģeoradara signāla atstarojumu.

Atzīmējams, ka arī, apskatot radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas citās vidēs, ir identificējami līdzīgi problemātiski jautājumi, kas kavē radiolokācijas metodes attīstību un pielietojamību zinātniskos un tautsaimnieciskos pētījumos kopumā. Tādējādi veiktajā pētījumā apskatītie jautājumi ir aktuāli, ne tikai apskatot radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas purvu nogulumu pētījumos, bet arī apskatot radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas ģeoloģiskos un glacioloģiskos pētījumos kopumā. Šī pētījuma gaitā izstrādātie metodiskie risinājumi ir pielietojami un ir tikuši pielietoti gan teriģēnu nogulumu pētījumos (Bērziņš, Karušs, 2014b), gan ledāju pētījumos (Lamsters, Karušs, 2014).

### **Darba hipotēze**

Izmantojot radiolokācijas metodi, ir iespējams purvos nodalīt kūdras slāņus ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām ar precizitāti, kas ir tuva urbšanas dziļuma noteikšanas precizitātei.

### **Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes**

1. Visus ģeoradara signāla atstarojumus, kas saistāmi ar robežām starp atšķirīgiem kūdras slāņiem, nevar skaidrot tikai ar mitruma atšķirībām starp tiem.
2. Kūdras elektromagnētiskās īpašības ietekmē gan kūdras sadalīšanās pakāpe, gan botāniskais sastāvs, kā arī vairāki citi faktori.
3. Purvu zinātniskos pētījumos ar radiolokācijas metodi ir jāveic ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma tieši mērījumi līdz katrai atstarotājevirsmai, kas saistāma ar ierakstītajās radarogrammās identificētajiem atstarojumiem.

### **Pētījuma mērķis un uzdevumi**

Purva nogulumu atšķiras pēc savām īpašībām, un šīs atšķirības var būt pietiekošas, lai tās izraisītu ģeoradara signāla atstarojumus. Līdzšinējos pētījumos ir tikuši sniegti skaidrojumi par iespējamiem ģeoradara signāla atstarojumu iemesliem (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Kettridge et al., 2008; Helleux, 1990), tomēr šajos pētījumos iegūtie rezultāti nereti ir pretrunīgi (Parsekian et al., 2012; Tolonen et al., 1984).

Promocijas darbam tika izvirzīti vairāki pētījumu virzieni, kas ir tieši saistīti ar disertācijā izskatīto pamattēmu – radiolokācijas signālu atstarojumu sasaiste ar purvu nogulumu īpašību izmaiņām. Sekojoši tika izvirzīts pētījuma mērķis: Izanalizēt un novērtēt radiolokācijas metodes izmantošanas iespējas purvu nogulumu pētījumos.

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi, tika noteikti šādi galvenie pētījuma uzdevumi:

- Apzināt un apkopot rezultātus, kas iegūti līdz šim veiktajos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi;
- Izstrādāt pētījuma mērķa sasniegšanai nepieciešamo lauka pētījumu un kamerālo datu apstrādes metodiku;



- Veikt kūdras iegulu ģeofizikālos mērījumus izvēlētajos pētījumu objektos;
- Noteikt un novērtēt kūdras tās fizikālās īpašības, kas galvenokārt nosaka kūdras elektromagnētiskās īpašības;
- Pētīt atstaroto ģeoradara signālu rašanās priekšnosacījumus un to ģeoloģisko interpretāciju.

### Novitāte

Latvijā purvu nogulumu pētījumi tiek veikti jau kopš 20. gadsimta sākuma (Šnore, 2004). Šo pētījumu gaitā ir apzināti gan kūdras krājumi, gan purvu attīstība.

Zinātniski radiolokācijas pētījumi Latvijas purvos ir tikuši veikti tikai atsevišķos gadījumos, no kuriem kā visaptverošākais šāda veida pētījums ir minams Sičova 1987. gadā veiktais pētījums (Sychev et al., 1987). Turpmākajos gados apjomīgi pētījumi, kuru mērķis ir apzināt radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas purvu nogulumu pētījumos, Latvijā netika veikti. Tādējādi ar veikto pētījumu ir tikuši aktualizēti purvu ģeofizikālie pētījumi Latvijā.

Tradicionāli purvu nogulumos iegūtie ģeoradara signāla atstarojumi tiek sasaistīti ar nogulumu slāņu robežām, un skaidrojums, kāpēc signāls ir ticis atstarots, tiek ievērojami vienkāršots. Tā, piemēram, salīdzinoši bieži tiek minēts, ka kūdras elektromagnētiskās īpašības nosaka tikai tās mitruma daudzums (Comas et al., 2011b; Kettridge et al., 2008; Holden et al., 2002). Disertācijas izstrādes gaitā veiktais pētījumu kopums skaidri norāda, ka iepriekšēji minētā pieeja nav uzskatāma par pietiekoši pamatotu zinātniskos pētījumos, kuru mērķis ir analizēt radiolokācijas metodes izmantošanas iespējas purvu pētījumos. Jauniegūtie pētījumu rezultāti un to interpretācija norāda, ka kūdras elektromagnētiskās īpašības ietekmē ne tikai tās mitruma daudzums, un minētais nosaka veiktā pētījuma novitāti.

Citos līdzīgas ievirzes pētījumos, lai sasaistītu pētītā purva ģeoloģisko griezumumu ar veiktajiem radiolokācijas mērījumiem, vairumā gadījumu ir tikuši izmantoti tikai atsevišķi ģeoloģiskie urbumi (Plado et al., 2011; Lowry et al., 2009). Rezultātā ierakstītajās radarogrammās identificēto ģeoradara signālu atstarojumu sasaistīšana nereti ir tikusi veikta tikai atsevišķos punktos. Tādējādi veiktā radiolokācijas mērījumu interpretācija ir pārbaudāma tikai atsevišķās vietās, un minētais liedz iegūt viennozīmīgus pierādījumus par identificēto ģeoradara signāla atstarojumu saistību ar purva ģeoloģiskajā griezumā noteiktajām kūdras fizikālo īpašību izmaiņām.

Autora pētījumā gar izvēlētajiem radiolokācijas profiliem tika ierīkoti vairāki urbumi ar salīdzinoši mazu savstarpējo attālumu, kas ļāva pētījuma gaitā ar augstu detalitāti pārbaudīt to, vai kādas konkrētas kūdras īpašības izmaiņas ir saistītas ar identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem.

Pētījuma gaitā tika veikti apjomīgi iegūto kūdras paraugu laboratoriski pētījumi, kuru rezultāti ļāva iegūt detalizētu kūdras fizikālo īpašību izmaiņu raksturojumu pētīto purvu ģeoloģiskajos griezumos. Tādējādi pētījuma gaitā iegūtie rezultāti var tikt izmantoti, lai nākotnē izveidotu datubāzi, kas būtu izmantojama, lai pārbaudītu izstrādātos matemātiskos modeļus, kas saista kūdras fizikālās īpašības ar tās elektromagnētiskajām īpašībām.

Pētījuma gaitā liela vērība tika pievērsta radiolokācijas mērījumu veikšanas metodikai un dziļumam, no kura ir saņemti identificētie atstarojumi. Rezultātā ar identificētajiem atstarojumiem tika sasaistītas tikai tās purvu nogulumu fizikālo īpašību izmaiņas, kuras tika identificētas dziļumos, kas atbilda dziļumiem, no kuriem tika saņemti ģeoradara signāla atstarojumi. Tādējādi pētījumā izstrādātā pieeja atšķiras no citos līdzīga rakstura pētījumos izmantotās pieejas, kuros nereti neliela vērība tiek piešķirta precīzām

dziļuma, no kura ir saņemti ģeoradara signāla atstarojumi, vērtībām (Oliveira et al., 2012; Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2005a; Slater, Reeve, 2002).

Pilnveidojot pētniecības metodoloģiju un veicot eksperimentālus darbus, konstatēts, ka starp galvenajām kūdras fiizkāļajām īpašībām kā nozīmīgākās, kas ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanos, izceļamas mitruma daudzums, sadalīšanās pakāpe, botāniskais sastāvs un pelnainība, to pētījumi disertācijā veido pamatu nozīmīgu zinātnisko secinājumu izdarīšanai.

Latvijā un visā Baltijas reģionā šādas ievirzes pētījums ir pirmais, un tāpēc tajā iegūtie rezultāti ir tikai neliela daļa no tā potenciālā informācijas apjoma, kas būtu apgūstams turpmākajos pētījumos nākotnē.

Disertācijas autors ar šo darbu uzsāk arī zinātnisku diskusiju par terminu izveidi un attīstību latviešu valodā saistībā ar radiolokācijas metodes izmantošanu, kas būtu izveidojami un pielāgojami lietošanai pētniecības vidē Latvijā. Terminoloģijas attīstībai visdrīzāk nākotnē būs nepieciešams izstrādāt atsevišķu visai daudzpusīgu pētījumu un tādēļ disertācijā autors lieto to terminoloģiju, kas ir nostiprinājusies lietišķajos pētījumos Latvijā pēdējo 30 gadu laikā un nenoliedzami ir visai pretrunīga.

### **Praktiskā pielietojamība**

Lai iegūtu nepieciešamo informāciju par purva uzbūvi un to veidojošo kūdras slāņu izplatību laterālā un vertikālā virzienā ar tradicionālām purvu nogulumu pētījumu metodēm, ir jāveic salīdzinoši laikietilpīgi un fiziski ļoti smagi lauka pētījumi. Pie tam iegūtie dati vairumā gadījumu raksturo purvu tā atsevišķos punktus, kā rezultātā iegūto datu telpiskā izšķirtspēja ir visai ierobežota. Tāpat problemātiska ir tradicionālo purvu nogulumu pētījumu metožu pielietošana teritorijās, kurās ir noteikti dabas liegumi, jo pamatā informācija par purva uzbūvi tradicionāli tiek iegūta, veicot urbšanas un zondēšanas darbus, kas ir destruktīvas metodes un nav pielietojamas vairumā aizsargājamo teritoriju.

Pētījuma gaitā tika pierādīts, ka ar radiolokācijas metodi ir iespējams iegūt vērtīgu un precīzu informāciju par purva iegulas uzbūvi. Sasaistot veiktos ģeofizikālos mērījumus ar pētījumu teritoriju ģeoloģiskajiem griezumiem, tika konstatēts, ka ģeoradara signāla atstarojumus izraisa gan kūdras mitruma daudzuma, gan kūdras sadalīšanās pakāpes, gan botāniskā sastāva izmaiņas. Iegūtie rezultāti liecina par to, ka precizitāte, ar kādu ir iespējams noteikt atsevišķu purva nogulumu slāņu biezumu, ir līdzīga vai atsevišķos gadījumos, domājams, pārsniedz urbšanas gaitā fiksējamo dziļuma precizitāti. Minētais norāda uz plašo radiolokācijas metodes pielietojamību gan zinātniskos, gan tautsaimnieciskos purvu pētījumos. Tā, piemēram, izmantojot ar ģeoradaru iegūtos purva biezuma mērījumus, ir iespējams izveidot augstas precizitātes purva biezumu kartes, kas var tikt izmantotas, aprēķinot kūdras krājumus. Tāpat ar ģeoradaru ir iespējams detalizēti noteikt atsevišķu kūdras slāņu telpisko izplatību, kas sniegtu vērtīgu informāciju dabas vēstures pētījumos.

Nākotnē, turpinot veiksmīgu, disertācijas gaitā uzsāktu, ar radiolokācijas metodi iegūto mērījumu veikšanas un interpretācijas metodikas pilnveidi, būs iespējams samazināt vai pat iztikt bez tehniski ļoti sarežģīti realizējamām mehāniskām pārbaudēm purvu pētījumos lauka apstākļos.

Vēl pētījuma gaitā iegūtie rezultāti ļāva izdalīt pētījumu virzienus, kurus attīstot, nākotnē būtu iespējams izdalīt kūdras slāņus, balstoties uz to elektromagnētiskajām īpašībām. Tas savukārt ļautu izstrādāt datu bāzes, kuras izmantojot, iegūto radiolokācijas mērījumu interpretators spētu sniegt salīdzinoši detalizētu purvu veidojošo nogulumu slāņu raksturojumu, izmantojot tikai ļoti ierobežotu daudzumu tiešos mērījumus.

Atzīmējams, ka šī pētījuma gaitā izstrādātās metodes un paņēmieni ir universāli pielietojami atšķirīgu nogulumu pētījumos. Tādējādi veiktā pētījuma rezultāti ir ļāvuši attīstīt radiolokācijas pētījumu metodiku kopumā, kas joprojām vairumā gadījumu tiek individuāli piemērota atsevišķu pētījumu vajadzībām, un tas, vai tā būs optimāli izvēlēta, lielākoties ir atkarīgs no pētījumu autoru personiskās pieredzes.

### Rezultātu aprobācija

Balstoties uz pētījuma rezultātiem, līdz 2015. gadam sagatavotas 19 zinātniskas publikācijas par atsevišķām pētījuma sadaļām un darbu kopumā.

#### **Raksti zinātniskos žurnālos, kas indeksēti Web of Science un SCOPUS datu bāzēs:**

Karušs, J., Bērziņš, D., In press. Ground-penetrating radar study of the Cenas tīrelis bog, Latvia: Linkage of reflections with peat moisture content. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 14 p.

Karušs, J., In press. New approach of depth from which GPR signals are received determination. *Geological Quarterly*. 10 p.

#### **Raksti recenzētos zinātnisko rakstu krājumos:**

Karušs, J., Bērziņš, D., In press. Correlation of in Makinu bog recorded ground-penetrating radar signal reflections with physical properties of peat. *RTU zinātnisko rakstu sērija: Materiālzinātne un lietišķā ķīmija*. 5 p.

Karušs, J., In press. Kopējā viduspunkta metodes izmantošana kūdras nogulumu pētījumos raksts. *LU rakstu Zemes un Vides zinātņu sērija*. 13 lpp.

Karušs, J., 2014. High precision calculation of move out correction in GPR measurements. *European Scientific Journal. February 2014 Special edition (3)*, 206-210.

Karušs, J., Segliņš, V., 2014. Metodiskas norādes purvu nogulumu pētījumiem ar radiolokācijas metodi. *Grām. Segliņš, V. (red.), Latvijas derīgie izrakteņi, jaunas tehnoloģijas, materiāli un produkti*. RTU izdevniecība, Rīga, lpp. 127-137.

Karušs, J., Celiņš, I., 2014. Radiolokācijas pētījumi kaļķakmens atradnē "Kūmas". *Grām. Segliņš, V. (red.), Latvijas derīgie izrakteņi, jaunas tehnoloģijas, materiāli un produkti*. RTU izdevniecība, Rīga, lpp. 56-67.

Karušs, J., Segliņš, V., 2013. Cenas tīrelī iegūto radiolokācijas signālu analīze. *RTU zinātnisko rakstu sērija: Materiālzinātne un lietišķā ķīmija 29*, 21-28.

Karušs, J., Vībāns, J., 2013. Radiolokācijas metodes izmantošana kūdras krājumu aprēķinos. *Grām. Andersons, B., Segliņš, V., Dubrovskis, D., Galoburda, R., Paeglītis, A. (red.), Valsts pētījumu programmas rakstu krājums: Vietējo resursu ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)*. Latvijas valsts koksnes ķīmijas institūts, Rīga, lpp. 56-60.

Karušs, J., 2013. Ground penetrating radar signal correlation with peat properties in Cenas tīrelis. *In Kļaviņš, M., Kalniņa, L. (eds.), Bog and Lake research in Latvia*. The University of Latvia press, Riga, pp. 32-35.

Karušs, J., Segliņš, V., 2012. Pētījumi ar ģeoradaru Taurenas apkārtnes smilšu iegulās. *LU rakstu Zemes un Vides zinātņu sērija 789*, 19-29.

#### **Raksti rediģētās zinātniskās grāmatās:**

Bērziņš, D., Karušs, J., 2014. Mapping shallow groundwater surface in terrigenous sediments using ground penetrating radar. *In. Zelčs, V., Nartišs, M. (eds.), Excursion guide and abstracts of the INQUA Peribaltic Working Group Meeting and field excursion in Eastern and Central Latvia, August 17-22, 2014*, Eastern and central Latvia. University of Latvia, Riga, pp. 97-98.

**Publikācijas konferenču ziņojumu izdevumos:**

Karušs, J., 2013. High precision calculation of move out correction in GPR measurements. *In. Proceedings of International scientific forum, ISF 2013, volume 3, December 12 - 14, 2013.* European Scientific Institute publishing, Tirana Albania, pp. 205-209.

**Starptautisko konferenču tēzes:**

Karušs, J., Segliņš, V., 2013. Seda peat bog deposit research with radiolocation method. *In. 17<sup>th</sup> International conference "EcoBalt 2012". Book of Abstracts.* University of Latvia press, Riga. pp. 38.

**Konferenču tēzes Latvijā:**

Bērziņš, D., Karušs, J., 2014. Mapping shallow groundwater surface in terrigenous sediments using ground penetrating radar. *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes.* Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 293-294.

Karušs, J., 2014. Kopējā viduspunkta metodes izmantošana purvu nogulumu pētījumos. *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes.* Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 312-314.

Vlads, A., Karušs, J., 2014. Radiolokācijas pētījumi Ķūķu purvā. *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes.* Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 338-340.

Karušs, J. 2013. Radiolokācijas pētījumi Cenas tīrelī. *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 71. zinātniskā konference. Referātu tēzes.* Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 437-439.

Karušs, J., 2010. Ģeoradara pētījumi Taurenas pagasta apkārtnes smilšu iegulās. *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 68. zinātniskā konference. Referātu tēzes.* Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 308-310.

**Papildus veikto zinātnisko pētījumu rezultāti:**

Papildus augstāk minētajam, atsevišķi disertācijā apskatītie metodiskie jautājumi, kas saistīti ar radiolokācijas mērījumu veikšanas, rezultātu interpretācijas un prezentācijas metodēm, ir aprobēti un pārbaudīti arī dažādos ģeoloģiskos un ģeofizikālos pētījumos, kas veikti gan Latvijā, gan arī citās Eiropas valstīs. Tā, piemēram, disertācijas autors ir veicis ūdens tilpņu (Radiolokācijas pētījumi ūdenstilpnēs), ledāju (Lamsters, Karušs, 2014), mālu (Karušs et al., 2012), smilts nogulumu (Vībāns, Karušs, 2013), arheoloģisko pieminekļu (Bērziņš et al., 2015), kā arī tehnogēno nogulumu (Burlakovs et al., 2014) radiolokācijas pētījumus. Atbilstošās sadaļas dažādos tehniskos pārskatos, atskaitēs un ziņojumos ir tikušas izstrādātas pēdējo 7 gadu laikā, daļa no tām savu atspoguļojumu ir guvušas arī šī promocijas darba ietvaros.

Zināma daļa pētījumā iegūto rezultātu, īpaši attiecībā uz pētījumu metodoloģiju, ir iestrādāta ģeoloģijas maģistra studiju programmas kursā „Radiolokācija ģeoloģiskajos pētījumos”, kas tiek īstenots LU Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātē. un ir guvis atsaucību arī citu studiju programmu un augstskolu studentu vidū.

Par radiolokācijas pētījumiem kopumā un disertācijas pētījuma rezultātiem disertācijas autors ir lasījis lekcijas interesentiem Zinātnes kafejnīcā, kā arī citos izglītojošos semināros.

## **Pateicības**

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē” un Valsts pētījumu programmas Nr. 2010.10-4/VPP-5ResProd 1. projekta GEO atbalstu.

Vēlos izteikt pateicību savam doktora darba vadītājām Valdim Segļiņam par sagādātajām iespējām veikt patstāvīgus pētījumus doktora studiju laikā. Domubiedriem, kas palīdzēja realizēt visus ieplānotos eksperimentus un lauka pētījumus – Dāvidam Bērziņam, Aleksejam Ņelajevam, Daigai Pipirai, Jurim Vībānam, Aleksandram Vladam. Tāpat vēlos izteikt pateicību speciālistiem, kas neliedza savas konsultācijas par mani interesējošiem jautājumiem – Agrim Andžānam, Georgijam Sičovam, Vladimiram Zolotarjovam. Visbeidzot liels paldies par morālo atbalstu Sandrai Muižniecei un Birutai Stafeckai.

# 1. Radiolokācijas metode un tās raksturojums

## 1.1. Elektromagnētiskie viļņi

Elektriskais un magnētiskais lauks vispārējā gadījumā ir vektoriāli lielumi – lai tos raksturotu, ir jānorāda gan to lielums, gan virziens. Tāpēc disertācijas izklāstā lielumi, kas sniegti vektoriālā formā vienādojumos, tiks norādīti ar treknrakstu.

J. Maksvels 1861. gadā publicēja četrus vienādojumus, kuri apvienoja līdz tam zināmās elektriskā un magnētiskā lauka likumsakarības. Minētos vienādojumus nereti izsaka diferenciālā formā (1.1, 1.2, 1.3 un 1.4 vienādojums) (Peatros, Ware, 2013).

J. Maksvels pēc šo vienādojumu apkopošanas atklāja, ka to atrisinājums ir viļņi.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = -\epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}, \text{ kur} \quad (1.4)$$

$\mathbf{E}$  – elektriskais lauks ( $\text{V m}^{-1}$ );

$\mathbf{B}$  – magnētiskais lauks (T);

$\rho$  – lādiņu blīvums ( $\text{C m}^{-3}$ );

$\mathbf{J}$  – strāvas blīvums ( $\text{A m}^{-2}$ );

$\epsilon_0$  – elektriskā konstante ( $\text{F m}^{-1}$ );

$\mu_0$  – magnētiskā konstante ( $\text{H m}^{-1}$ );

$t$  – laiks (s).

Tā, piemēram, apvienojot vienādojumus 1.1, 1.3 un 1.4, tiek iegūts vienādojums, kas apraksta elektrisko lauku (1.5 vienādojums). Līdzīgi ir iespējams iegūt vienādojumu, kas apraksta magnētisko lauku (Peatros, Ware, 2013). Atzīmējams, ka vairumam nogulumiežu, tai skaitā purvu nogulumu, magnētiskās īpašības ir salīdzinoši neizteiktas (Jol, 2009), tādēļ turpmāk tekstā, apskatot elektromagnētiskos viļņus, pamatā tiks izmantota to elektriskā lauka komponente.

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \frac{\nabla \rho}{\epsilon_0}, \text{ kur} \quad (1.5)$$

$\mathbf{E}$  – elektriskais lauks ( $\text{V m}^{-1}$ );

$\mathbf{J}$  – strāvas blīvums ( $\text{A m}^{-2}$ );

$\rho$  – lādiņu blīvums ( $\text{C m}^{-3}$ );

$\epsilon_0$  – elektriskā konstante ( $\text{F m}^{-1}$ );

$\mu_0$  – magnētiskā konstante ( $\text{H m}^{-1}$ );

$t$  – laiks (s).

Apskatot elektromagnētisko viļņu izplatību vakuumā, vienādojums 1.5 vienkāršojas uz vienādojumu 1.6, jo vakuumā gan lādiņu blīvums, gan strāvas blīvums ir vienāds ar nulli. Minēto vienādojumu iespējams atrisināt, izmantojot funkciju, kas apraksta viļņus (vienādojums 1.7).

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \text{ kur} \quad (1.6)$$

$\mathbf{E}$  – elektriskais lauks ( $\text{V m}^{-1}$ );  
 $\epsilon_0$  – elektriskā konstante ( $\text{F m}^{-1}$ );  
 $\mu_0$  – magnētiskā konstante ( $\text{H m}^{-1}$ );  
 $t$  – laiks (s).

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \text{Re} \left\{ \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \right\}, \text{ kur} \quad (1.7)$$

$\mathbf{E}$  – elektriskais lauks ( $\text{Vm}^{-1}$ );  
 $\tilde{\mathbf{E}}_0$  – kompleksā elektriskā lauka amplitūda ( $\text{Vm}^{-1}$ );  
 $\mathbf{k}$  – viļņa vektors ( $\text{m}^{-1}$ );  
 $\mathbf{r}$  – apskatītā telpas punkta novietojums (m);  
 $\omega$  – leņķiskā frekvence (Hz);  
 $t$  – laiks (s).

Tāpat no vienādojuma 1.6 izriet, ka elektromagnētiskie viļņi vakuumā izplatās ar ātrumu, kas vienāds ar  $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  (Peatros, Ware, 2013).

### 1.1.1. Elektromagnētisko viļņu izplatīšanās dielektriķos

Dielektriķis ir viela, kurā nav sastopami brīvi elementārlādiņi. Kopumā nogulumieži, to skaitā arī kūdra, pēc savām īpašībām ir uzskatāmi par dielektriķiem (Jol, 2009). Tomēr tajos ir sastopami arī brīvie lādiņi, kā rezultātā tiem piemīt arī elektrovadītspēja. Raksturojot nogulumiežus un iežus kopumā, nereti tiek lietots termins „lossy dielectrics” – dielektriķis ar zudumiem (Jol, 2009). Tādēļ, aprakstot elektromagnētisko viļņu izplatīšanos nogulumiežos, nav pareizi nepastarpināti izmantot vienādojumu 1.6. Lai korekti aprakstītu elektromagnētisko viļņu izplatīšanos nogulumiežos, vienādojumā ir jāiekļauj nogulumiežiem raksturīgās elektromagnētiskās īpašības (vienādojums 1.8).

Pie tam, ņemot vērā, ka tiek apskatīts laikā mainīgs elektromagnētiskais lauks un ka viļņu vienādojumi tiek izteikti, izmantojot komplekso formu (1.7 vienādojums), gan dielektriskā caurlaidība, gan elektrovadītspēja ir jāizsaka kompleksā formā (1.1.2. nodaļa).

Zinātniskajā literatūrā, kas veltīta radiolokācijas pētījumu problemātikai (Jol, 2009; Izyumov et al., 2008), parasti tiek izmantots termins „relatīvā dielektriskā caurlaidība”, kas ir vienāds ar absolūtas dielektriskās caurlaidības dalījumu ar elektrisko konstanti. Līdzīgi, runājot par magnētiskās caurlaidības dalījumu ar magnētisko konstanti, tiek lietots termins „relatīvā magnētiskā caurlaidība” (Jol, 2009; Izyumov et al., 2008). Vadoties pēc līdzšinējās lietojuma prakses, aprakstot elektromagnētisko viļņu izplatību dielektriķos, tiks izmantota relatīvā dielektriskā caurlaidība (turpmāk tekstā relatīvā dielektriskā caurlaidība tiks saukta par dielektrisko caurlaidību) un relatīvā magnētiskā caurlaidība (turpmāk tekstā relatīvā magnētiskā caurlaidība tiks saukta par magnētisko caurlaidību).

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \dot{\epsilon} \dot{\mu} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \dot{\mu} \dot{\sigma} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \text{ kur} \quad (1.8)$$

$\mathbf{E}$  – elektriskais lauks ( $\text{V m}^{-1}$ );  
 $\rho$  – lādiņu blīvums ( $\text{C m}^{-3}$ );  
 $\epsilon_0$  – elektriskā konstante ( $\text{F m}^{-1}$ );  
 $\dot{\epsilon}$  – kompleksā dielektriskā caurlaidība;  
 $\mu_0$  – magnētiskā konstante ( $\text{H m}^{-1}$ );  
 $\dot{\mu}$  – kompleksā magnētiskā caurlaidība;  
 $\dot{\sigma}$  – kompleksā elektrovadītspēja ( $\text{S m}^{-1}$ );  
 $t$  – laiks (s).

Atzīmējams, ka vairumā gadījumu, apskatot radiolokācijas pētījumu problemātiku, tiek pieņemts, ka nogulumiežos magnētiskās īpašības ir nenozīmīgas, kā rezultātā nogulumiežos magnētiskā caurlaidība tiek pieņemta kā vienāda ar vienu (Jol, 2009). Ņemot vērā to, ka iepriekšējos pētījumos iegūtie rezultāti liecina, ka kūdrai nav raksturīgas izteiktas magnētiskās īpašības, šis pieņēmums uzskatāms par korektu, apskatot šajā pētījuma gaitā iegūtos rezultātus.

Sekojoši, ievietojot vienādojumā 1.8 viļņu vienādojumu 1.7, tiek iegūts vienādojums, kas sasaista elektromagnētisko viļņu garumu, izplatīšanās ātrumu un frekvenci, tiem izplatoties nogulumiežos (vienādojums 1.9) (Steck, 2013).

$$k = \omega \frac{1}{c} \sqrt{\dot{\epsilon} + i \frac{\dot{\sigma}}{\omega \epsilon_0}} = \omega \frac{\dot{N}}{c} = \omega \frac{n + i\kappa}{c}, \text{ kur} \quad (1.9)$$

$k$  – viļņa vektora lielums ( $\text{m}^{-1}$ );  
 $\dot{N}$  – kompleksais gaismas laušanas koeficients;  
 $n$  – gaismas laušanas koeficienta reālā daļa;  
 $\kappa$  – gaismas laušanas koeficienta imaginārā daļa;  
 $\dot{\sigma}$  – kompleksā elektrovadītspēja ( $\text{S m}^{-1}$ );  
 $\dot{\epsilon}$  – kompleksā dielektriskā caurlaidība;  
 $c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );  
 $\epsilon_0$  – elektriskā konstante ( $\text{F m}^{-1}$ );  
 $\omega$  – leņķiskā frekvence (Hz).

No iegūtā vienādojuma izriet, ka, lai korekti aprakstītu elektromagnētisko viļņu izplatīšanos nogulumiežos (tai skaitā kūdrā), ir jāizmanto kompleksais gaismas laušanas koeficients (Peatros, Ware, 2013; Steck, 2013). Rezultātā, izmantojot iegūto sakarību un vienādojumu 1.7, tiek iegūts vienādojums, ar kuru iespējams aprēķināt elektromagnētiskā viļņa amplitūdu un fāzi atkarībā no novietojuma un laika (1.10 vienādojums). Atzīmējams, ka vispārīgā gadījumā elektromagnētisko viļņu izplatīšanās tiek apskatīta trīs dimensijās (Thide, 2011). Taču purvu nogulumu slāņi vairumā gadījumu ir laterālā virzienā izturēti, un tiem ir raksturīgs subhorizontāls sagulums, tāpēc turpmākajā šī pētījuma gaitā tiks pieņemts, ka ģeoradara signāls ceļo līdz atstarotārvirsmām un atpakaļ līdz uztvērējanteni vertikālā virzienā. Sekojoši elektromagnētisko viļņu izplatīšanās turpmāk tekstā tiks apskatīta, izmantojot tikai vienu dimensiju (1.10 vienādojums).

Kā redzams, gaismas laušanas koeficienta reālā daļa ietekmē elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu, turpretim imaginārā daļa tā amplitūdas zudumus.



$$E(x,t) = E_0 e^{-\frac{\kappa\omega}{c}x} \cos\left(\frac{n\omega}{c}x - \omega t + \phi\right), \text{ kur} \quad (1.10)$$

- $E$  – elektriskais lauks ( $\text{V m}^{-1}$ );  
 $E_0$  – elektriskā lauka sākotnējā amplitūda ( $\text{V m}^{-1}$ );  
 $n$  – gaismas laušanas koeficienta reālā daļa;  
 $\kappa$  – gaismas laušanas koeficienta imaginārā daļa;  
 $\omega$  – leņķiskā frekvence (Hz);  
 $c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );  
 $x$  – distance (m);  
 $\omega$  – leņķiskā frekvence (Hz);  
 $t$  – laiks (s);  
 $\phi$  – fāze.

Tālāk, izmantojot vienādojumu 1.11 un 1.12, iespējams sasaistīt gaismas laušanas koeficienta reālo un imagināro daļu ar komplekso dielektrisko caurlaidību un komplekso elektrovadītspēju.

$$n = \sqrt{\frac{\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega\varepsilon_0}\right) + \sqrt{\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega\varepsilon_0}\right)^2 + \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega\varepsilon_0}\right)^2}}{2}} \quad (1.11)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{-\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega\varepsilon_0}\right) + \sqrt{\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega\varepsilon_0}\right)^2 + \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega\varepsilon_0}\right)^2}}{2}}, \text{ kur} \quad (1.12)$$

- $n$  – gaismas laušanas koeficienta reālā daļa;  
 $\kappa$  – gaismas laušanas koeficienta imaginārā daļa;  
 $\varepsilon'$  – dielektriskās caurlaidības reālā daļa;  
 $\varepsilon''$  – dielektriskās caurlaidības imaginārā daļa;  
 $\sigma'$  – elektrovadītspējas reālā daļa ( $\text{S m}^{-1}$ );  
 $\sigma''$  – elektrovadītspējas imaginārā daļa ( $\text{S m}^{-1}$ );  
 $\varepsilon_0$  – elektriskā konstante ( $\text{F m}^{-1}$ ).

Iegūtie vienādojumi norāda uz nogulumiežu elektromagnētisko īpašību komplekso saistību ar elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu un amplitūdas zudumiem tajos.

Analizējot literatūru, kur apskatīta ar radiolokācijas jautājumiem saistītā problemātika (Jol, 2009; Neal, 2004; Reynolds, 1997), jāsecina, ka nereti minētie vienādojumi tiek būtiski vienkāršoti. Visbiežāk, aprakstot ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumiežos, tiek pieņemts, ka dielektriskās caurlaidības imaginārā daļa un elektrovadītspēja salīdzinājumā ar dielektriskās caurlaidības reālo daļu ir mazas. Kā rezultātā, aprēķinot elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrumu nogulumiežos, tiek izmantots 1.13 vienādojums. Tomēr minētais vienādojums uzskatāms par būtisku patiesās situācijas vienkāršojumu, jo nereti nogulumiežiem ir raksturīga salīdzinoši liela elektrovadītspēja (Reynolds, 1997). Tāpat gadījumos, ja pētījumā tiek izmantota antenu sistēma ar salīdzinoši augstu centrālo frekvenci, dielektriskās caurlaidības imaginārā daļa būtiski ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumiežos (Fröhlich, 1949). Taču, lai būtu iespējams salīdzināt šī pētījuma gaitā iegūtos rezultātus ar citu pētnieku līdz

šim veikto pētījumu rezultātiem, turpmākos aprēķinos tiks izmantots vienādojums 1.13. Sekojoši, apskatot autora pētījuma gaitā pielietoto metodiku un iegūtos rezultātus, tiks izmantota dielektriskā caurlaidība ( $\epsilon$ ), kas pēc būtības ir vienāda ar gaismas laušanas koeficienta reālo daļu kāpinātu kvadrātā.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}, \text{ kur} \quad (1.13)$$

$v$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums dielektriķī ( $\text{m s}^{-1}$ );

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\epsilon'$  – dielektriskās caurlaidības reālā daļa.

### 1.1.2. Dielektriskā caurlaidība

Zinātniskajās monogrāfijās, kā arī zinātniskajos rakstos, kuros aprakstīti nogulumiežu pētījumi ar radiolokācija metodi, vairumā gadījumu tiek uzsvērta nogulumiežu dielektriskās caurlaidības noteicošā ietekme uz elektromagnētisko viļņu izplatīšanos tajos un atstarošanas no to robežvirsmām (Jol, 2009; Plado et al., 2011; Comas, Slater, 2007; Reynolds, 1997). Iepriekš minētais noteica to, ka šī pētījuma izstrādes gaitā uzmanība tika pievērsta tām nogulumu īpašībām, kas potenciāli varētu ietekmēt nogulumu dielektrisko caurlaidību.

Tādēļ tika sagatavots konspektīvs dielektriskās caurlaidības raksturojums. Savukārt detalizēts dielektriskās caurlaidības apraksts, kā arī tās atkarība no ārējā elektriskā lauka frekvences analīze ir izklāstīta vairākās zinātniskajās monogrāfijās (Von Hippel, 1954; Fröhlich, 1949).

Dielektriskā caurlaidība raksturo dielektriķa polarizāciju ārējā elektriskajā laukā (Platacis, 1974). Noteikts, ka gadījumos, kad ārējais elektriskais lauks ir laikā mainīgs, lai korekti aprakstītu dielektriķa polarizāciju, ir jāizmanto kompleksā dielektriskā caurlaidība (Peatros, Ware, 2013; Steck, 2013; Fröhlich, 1949), kas ļauj raksturot gan polarizācijas lielumu, gan tās fāzi attiecībā pret pielikto elektrisko lauku.

Iepriekšējie pētījumi norāda, ka, analizējot nogulumiežus, kopumā uzmanība galvenokārt jāpievērš diviem polarizācijas veidiem – elastīgajai polarizācijai un orientācijas polarizācijai (Vladov, Starovoytov, 2004).

Ar elastīgās polarizācijas mehānismu nereti apraksta „elektronu mākoņa” nobīdi relatīvi atoma kodolam - ārējā elektriskā lauka iedarbībā. Minēto nobīžu detalizētu analīzi iespējams veikt, izmantojot Lorenca modeli (Peatros, Ware, 2013).

Dielektriskās caurlaidības reālā daļa dielektriķiem, kam raksturīgs šāds polarizācijas veids, radiolokācijas pētījumos pielietoto frekvenču diapazonā (1.2.2. nodaļa) ir neliela. Savukārt dielektriskie zudumi praktiski nav novērojami (veicot aprēķinus, dielektriskās caurlaidības imagināro daļu var neņemt vērā). Elastīgā polarizācija piemīt vairumam minerālu, kas nosaka to, ka tiem raksturīgā dielektriskās caurlaidības reālā daļa ir salīdzinoši maza (piemēram, kvarcs – 4,6, kalcīts – 8, dolomīts – 7,3) (Telford et. al., 1990).

Orientācijas polarizācija ir raksturīga vielām, kas sastāv no molekulām, kuras veido patstāvīgu elektrisko dipolu. Ārējā elektriskā laukā šādas molekulas relatīvi ilgāku laika periodu pavada stāvoklī, kurā to dipola moments ir orientēts paralēli elektriskā lauka virzienam (Fröhlich, 1949). Atzīmējams, ka vielām, kurām piemīt orientācijas polarizācija, ir raksturīgas salīdzinoši augstas gan dielektriskās caurlaidības reālās daļas, gan imaginārās daļas vērtības (Vladov, Starovoytov, 2004).

Nogulumiežus veidojošajām minerāldaļiņām nav raksturīga orientācijas polarizācija, taču vairumā gadījumu nogulumieži satur ūdeni. Ūdens molekula savukārt veido izteiktu elektrisko dipolu, kas nosaka to, ka ūdenim piemīt orientācijas polarizācija. Rezultātā nogulumu slāņu dielektriskā caurlaidība ir lielā mērā atkarīga no to mitruma daudzuma – proti, mitriem nogulumiežiem tā ir relatīvi lielāka (1.1. tabula). Tāpat, ņemot vērā to, ka kūdras slāņu dabiskais mitruma daudzums ir tuvs 90% (Boelter, 1968), tiem raksturīgo dielektrisko caurlaidību lielā mērā nosaka ūdenim raksturīgā dielektriskā caurlaidība.

### 1.1. tabula. Grunšu veidojošo materiālu elektromagnētiskās īpašības

Tabula sastādīta, izmantojot Neal, 2004. Tabulā sniegtas vērtības, kas iegūtas, veicot mērījumus pie 80 – 120 MHz frekvences.

Table 1.1. Electromagnetic properties of soil forming materials

The table was compiled using Neal, 2004. The values shown in the table have been obtained during experiments with a frequency range from 80 to 120 MHz.

	$\epsilon'$	Signāla zudumi (dB m <sup>-1</sup> )
Gaiss	1	0
Saldūdens	81	0,1
Jūras ūdens	81	1000
Sausas smiltis	2,55 – 7,5	0,01 – 0,14
Slapjas smiltis	20 – 31,6	0,03 – 0,5
Kūdra	57 – 80	0,3
Sauss aleirīts	2,5 – 5	1 – 300
Slapjš aleirīts	22 – 30	1 – 300

Kā redzams no tabulas datiem, kūdrai raksturīgā dielektriskā caurlaidība variē salīdzinoši plašā intervālā. Minētais norāda, ka, veicot augstas precizitātes elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma aprēķinus, nav korekti mehāniski pielietot līdzšinējos pētījumos iegūtās dielektriskās caurlaidības vērtības.

### 1.1.3. Impulsa izplatīšanās dielektriķī

Līdz šim tika apskatīta harmonisku elektromagnētisko viļņu izplatīšanās dielektriķos (1.1. un 1.1.1. nodaļa). Sekojoši, izmantojot līdz šim iegūtos vienādojumus elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātruma aprēķināšanai, iespējams aprēķināt elektromagnētiskā viļņa, kam raksturīga konkrēta frekvence, izplatīšanās ātrumu – fāzes ātrumu. Līdzīga situācija ir arī, raksturojot elektromagnētisko viļņu amplitūdas zudumus.

Taču ģeoradars izstaro pusotru periodu garu signālu (1.2.2. nodaļa), kura aprakstīšanai jāizmanto salīdzinoši plašs frekvenču spektrs. Ņemot vērā to, ka radiolokācijas pētījumu vajadzībām nepieciešams aprakstīt signāla izplatīšanās ātrumu, ir nepieciešams aprakstīt summāro ātrumu, ar kādu pārvietojas pats signāls, nevis atsevišķi to veidojošie harmoniskie viļņi. Proti, nepieciešams aprakstīt grupas ātrumu (Peatros, Ware, 2013).

Dielektriķiem raksturīgā dielektriskā caurlaidība ir atkarīga no pieliktā elektriskā lauka frekvences (1.1.2. nodaļa), un ir sagaidāms, ka elektromagnētiskie viļņi ar dažādām frekvencēm pārvietosies ar atšķirīgiem ātrumiem. Minētais nosaka to, ka vispārīgā gadījumā fāzes ātrums un grupas ātrums būs atšķirīgi. Rezultātā, lai aprēķinātu ātrumu, ar

kādu pārvietojas izstarotais signāls dielektrikā, ir jāizmanto vienādojums 1.14 (Steck, 2013).

$$v_g = \frac{c}{n + \omega_0 \left. \frac{\partial n}{\partial \omega} \right|_{\omega_0}}, \text{ kur} \quad (1.14)$$

$v_g$  – signāla izplatīšanās ātrums ( $\text{m s}^{-1}$ );

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$n$  – gaismas laušanas koeficienta reālā daļa;

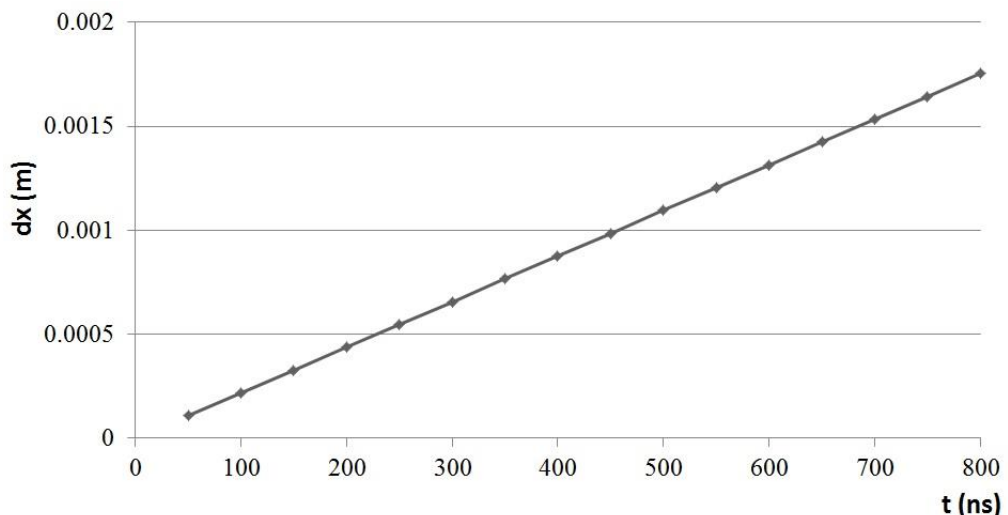
$\omega$  – leņķiskā frekvence (Hz);

$\omega_0$  – impulsa centrālā leņķiskā frekvence (Hz).

Kūdras slāņi ir salīdzinoši sarežģīta daudzfāzu vide, kā rezultātā līdz šim nav izdevies izstrādāt fizikālo modeli, kurš precīzi aprakstītu kūdras dielektriskās caurlaidības atkarību no pieliktā elektriskā lauka frekvences. Sekojoši, izmantojot vienādojumu 1.14, nav iespējams aprēķināt signāla izplatīšanās ātrumu tajā. Savukārt ūdenim raksturīgās dielektriskās caurlaidības atkarību no pieliktā elektriskā lauka frekvences salīdzinoši veiksmīgi iespējams aprakstīt, izmantojot Debaja vienādojumus (Fröhlich, 1949). Rezultātā, apskatot elektromagnētisko viļņu izplatīšanos ūdenī, ir iespējams aprēķināt fāzes ātruma atšķirības no grupas ātruma.

Kūdras slāņi ar dabisku mitruma daudzumu satur aptuveni 90% ūdeni (Boelter, 1968). Tādējādi, lai tuvināti novērtētu fāzes ātruma atšķirības no grupas ātruma kūdras slāņos, ir iespējams izmantot aprēķinus, kas veikti, apskatot elektromagnētisko viļņu izplatīšanos ūdenī.

Veicot radiolokācijas zondēšanu purvā, tika konstatēts, ka ar 300 MHz antenu sistēmu izstarotā ģeoradara signāla centrālā frekvence ir aptuveni 120 MHz (Karušs, Bērziņš, In press). Iepriekš minētais noteica to, ka atšķirības starp grupas ātrumu un fāzes ātrumu ūdenī tika novērtētas pie 120 MHz frekvences. Lai novērtētu ātrumu atšķirības, tika aprēķināta atšķirība starp distancēm, ko veiktu signāls ar centrālo frekvenci 120 MHz un harmonisks elektromagnētiskais vilnis ar frekvenci 120 MHz (1.1. attēls).



1.1. attēls. Atšķirība starp distancēm, ko veiktu signāls ar centrālo frekvenci 120 MHz un harmonisks elektromagnētiskais vilnis ar frekvenci 120 MHz

Figure 1.1. A difference between distance that signal with a central frequency of 120 MHz and a harmonic electromagnetic wave with 120 MHz frequency would accomplish

500 ns laikā elektromagnētiskais signāls ar centrālo frekvenci 120 MHz ūdenī veic 16,36 m. Savukārt harmonisks elektromagnētiskais vilnis ar frekvenci 120 MHz 500 ns laikā veic distanci, kas ir aptuveni par 0,1 cm mazāka. Veiktie aprēķini norāda, ka atšķirības starp grupas ātrumu un fāzes ātrumu ir nenozīmīgas.

Ņemot vērā veiktos aprēķinus, jāsecina, ka, apskatot ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu kūdrā, ir korekti izmantot formulas, kuras iegūtas, aprakstot harmonisku elektromagnētisko viļņu izplatību dielektriķos (1.1.1. nodaļa). Rezultātā minēto formulu izmantošana iegūto rezultātu analīzes un interpretācijas laikā ir uzskatāma par korektu.

Protams iepriekš aprakstītie aprēķini tika veikti, apskatot gadījumu, kad elektromagnētiskie viļņi izplatās ūdenī. Tomēr ir maza varbūtība, ka kūdras slāņos būtu sastopamas vielas, kam būtu lielāks elektriskais dipols nekā ūdenim vai izteiktāka dielektriskās caurlaidības atkarība no frekvences radiolokācijas pētījumos izmatotajā frekvenču diapazonā. Tādējādi uzskatāms, ka veikto aprēķinu rezultāti ir pielietojami kūdras dielektriskās caurlaidības atkarības no pieliktā elektriskā lauka frekvences raksturošanai.

#### 1.1.4. Elektromagnētisko viļņu atstarošanās no robežvirsmām

Radiolokācijas profilēšanas gaitā tiek mērīts laiks, pēc kura ir saņemti izstarotā signāla atstarojumi, kā arī atstarojumu amplitūda. Tādējādi ir būtiski apskatīt vides īpašības, kas izraisa izstarotā signāla atstarošanos.

Elektromagnētisko viļņu atstarošanos no robežvirsmas starp divām vidēm parasti apraksta, izmantojot Frenela koeficientus (Peatros, Ware, 2013). Apskatot robežu starp divām vidēm, kam raksturīgas atšķirīgas elektromagnētiskās īpašības, iespējams izdalīt divas raksturīgas situācijas. Pirmajā gadījumā krītošā elektromagnētiskā viļņa elektriskā lauka komponente ir paralēla krišanas plaknei. Otrajā gadījumā krītošā elektromagnētiskā viļņa elektriskā lauka komponente ir perpendikulāra krišanas plaknei (1.2. attēls). Apskatot robežnosacījumus uz robežas starp abām vidēm, abi gadījumi ir jāanalizē atsevišķi. Tāpat aprēķinos jāņem vērā leņķis starp atstarotā virsmas normāli un elektromagnētiskā viļņa izplatīšanās virzienu (Peatros, Ware, 2013). Minētais ievērojami sarežģīt atstarošanās koeficientu aprēķinus.

Šī pētījuma gaitā tika analizēti purvos iegūtie radiolokācijas mērījumi. Ņemot vērā to, ka purva nogulumu slāņu robežas kopumā ir subhorizontālas un laterāli izturētas, šī pētījuma gaitā tika pieņemts, ka izstarotais ģeoradara signāls krīt uz nogulumu slāņu robežām paralēli to normālei. Tādējādi starp abiem izdalītajiem elektriskā lauka polarizācijas gadījumiem vairs nav atšķirību. Tāpat, ņemot vērā to, ka ģeoradara signāla izplatīšanās virziens vienmēr ir paralēls nogulumu slāņu virsmu normālēm, vienādojumos nav jāiekļauj atstarošanās koeficienta atkarība no krišanas leņķa. Rezultātā atstarošanās koeficientu no robežvirsmām iespējams aprēķināt, izmantojot vienādojumu 1.15.

$$r = \frac{\dot{N}_1 - \dot{N}_2}{\dot{N}_1 + \dot{N}_2} = \frac{n_1 - n_2 + i(\kappa_1 - \kappa_2)}{n_1 + n_2 + i(\kappa_1 + \kappa_2)} = \frac{\sqrt{(n_1 - n_2)^2 + (\kappa_1 - \kappa_2)^2}}{\sqrt{(n_1 + n_2)^2 + (\kappa_1 + \kappa_2)^2}} e^{i \left( \tan^{-1} \left( \frac{\kappa_1 - \kappa_2}{n_1 - n_2} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{n_1 + n_2} \right) \right)}, \text{ kur (1.15)}$$

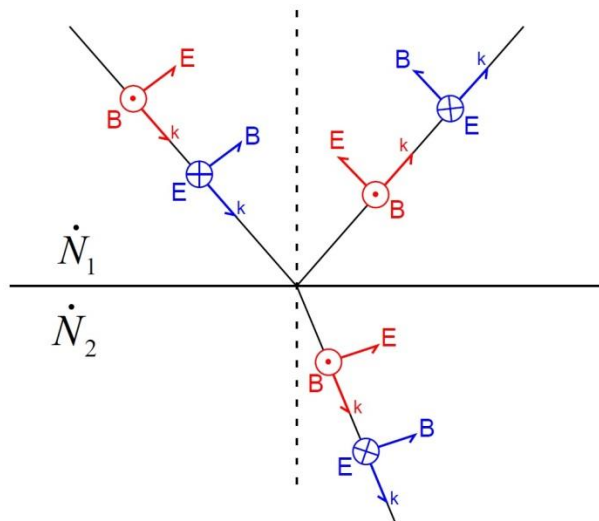
$r$  – atstarošanās koeficients;

$\dot{N}$  – kompleksais gaismas laušanas koeficients;

$n$  – gaismas laušanas koeficienta reālā daļa;

$\kappa$  – gaismas laušanas koeficienta imaginārā daļa.

Kā redzams, elektromagnētiskā viļņa atstarošanās uz robežvirsmas var izraisīt vai nu atšķirības starp vidēm raksturīgajām gaismas laušanas koeficienta reālajām daļām, vai arī atšķirības starp vidēm raksturīgajām gaismas laušanas koeficienta imaginārajām daļām. Tāpat no iegūtā vienādojuma izriet, ka atstarotā signāla fāze var variēt salīdzinoši plašā intervālā.



### 1.2. attēls. Elektromagnētisko viļņu laušana un atstarošanās uz robežvirsmas

Apzīmējumi: Ar sarkanu krāsu apzīmēts gadījums, kad elektriskā lauka komponente ir paralēla krišanas plaknei, savukārt ar zilu krāsu apzīmēts gadījums, kad elektriskā lauka komponente ir perpendikulāra krišanas plaknei; E – elektriskā lauka vektors; B – magnētiskā lauka vektors; k – elektromagnētiskā viļņa izplatīšanās virziens;  $\dot{N}$  – kompleksais gaismas laušanas koeficients.

#### Figure 1.2. Reflection and refraction of electromagnetic waves on a boundary

Legend: A case of electric field component being parallel to the plane of incidence is shown in red and one with electric field component being perpendicular to the plane of incidence – in blue; E – vector of electric field; B – vector of magnetic field; k – direction of propagation of electromagnetic wave;  $\dot{N}$  – complex light refractive index.

## 1.2. Ģeoradara darbības principi

### 1.2.1. Radiolokācijas metodes pirmsākumi un attīstības vēsture

Par radiolokācijas pirmsākumiem uzskatāmi H. Herca 19. gadsimtā veiktie eksperimenti, ar kuru palīdzību viņš nodemonstrēja, ka metāliski objekti atstaro radioviļņus (Huurdemann, 2003). Tomēr šādas iekārtas, kuru darbībā tika izmantotas elektromagnētisko viļņu izplatīšanās un atstarošanās likumsakarības, plaši izplatītas un viegli pieejamas kļuva tikai sākot ar 20. gadsimta sākumu (Raymond, 2009). Vācu izgudrotājs K. Hülsmajers (C. Hülsmayer) bija pirmais, kurš, izmantojot H. Herca atklājumus, uzbūvēja iekārtu, ar kuru bija iespējams noteikt kuģu atrašanās vietu jūrā. Viņa iekārta tika izmantota, lai novērstu kuģu saskriešanos gadījumus biežā miglā (Raymond, 2009).

Turpmākajos gados tika veikti vairāki pētījumi un atklājumi, kuru rezultātā mūsdienās radiolokācijas metode tiek plaši pielietota civilajām un militārajām vajadzībām: gan organizējot kuģu pārvietošanos, gan aviācijā, gan informācijas ieguvē par zemes un kosmosa uzbūvi (Raymond, 2009; Skolnik, 2008).

Pirmie gadījumi, kad novērotas radiolokācijas metodes potenciālās iespējas ģeoloģiskajos pētījumos, reģistrēti jau pagājušā gadsimta piecdesmitajos gados. Šajā laika posmā ir tikuši dokumentēti pirmie gadījumi, kad, lidmašīnām pārlidojot teritorijas, kuras klāj ledus sega, altimetri ir ierakstījuši divus dažādus augstuma mērījumus. Vēlāk,

analizējot iegūtos mērījumus, tika konstatēts, ka viens no mērījumiem ir saistāms ar ledus segas virsmu, kamēr otrs ar tās pamatni (Bogorodsky et al., 1985). Šo atklājumu vēlāk izmantoja, nosakot ledus segas biezumu virs jūrām. Tomēr, ņemot vērā to, ka šie pētījumi bieži vien tika veikti dažādu valstu militāro dienestu vajadzībām, zinātniskajā literatūrā šie novērojumi un to analīze ir aprakstīti tikai virspusēji (Bogorodsky et al., 1985).

Vēlāk, laika periodā no 1960. līdz 1970. gadam, tika veikti vairāki eksperimentāli radiolokācijas metodes pielietošanas iespēju pētījumi. Tika veikti atsevišķi pētījumi ar mērķi noteikt radiolokācijas metodes pielietošanas iespējas iežu sasaluma zonas izpētē, nosakot gruntsūdens līmeni tuksnešos, mērot dolomīta slāņu biezumu (Cook, 1960). Šajā laika periodā paralēli dažādās valstīs notika radiolokācijas metodes izmantošanai ģeoloģiskos pētījumos nepieciešamo iekārtu izstrāde. Šādi tehnisku risinājumu meklējumi tika veikti arī Latvijā, Civilās Aviācijas inženieru institūtā, kas vēlāk (pagājušā gadsimta astoņdesmito gadu beigās) pamatoti tika uzskatīts par vadošo radiolokācijas metodes pētījumu centru šajā jomā bijušo sociālistisko valstu blokā (Finkel'shteyn, 1974).

Minēto pētījumu rezultāti tika apkopoti 1977. gadā izdotajā M. Finkelšteina grāmatā, kas uzskatāma par tā laika vienu no labākajām publikācijām, kurā apkopotas zināšanas par radiolokācijas metodes teorētisko pamatojumu, kā arī iespējām to pielietot ģeoloģiskajā izpētē (Finkel'shteyn, et al., 1977).

Pagājušā gadsimta septiņdesmito gadu beigās tika izstrādātas pirmās specializētās iekārtas konkrētu pētniecības uzdevumu risināšanai. Tā, piemēram, Kanādā tiek izstrādāti ceļu seguma kvalitātes kontrolei piemēroti ģeoradari. Tāpat tiek veikti vairāki apjomīgi pētījumi, kuru rezultātā tiek pierādīts, ka ar radiolokācijas metodi iegūtos rezultātus ir iespējams pielietot, aprēķinot kūdras krājumus purvos (Bogorobskiy, Trepov, 1979).

Divdesmitā gadsimta astoņdesmito gadu sākumā tiek pievērsta uzmanība jautājumiem, kas saistīti ar radiolokācijas metodi iegūto datu interpretāciju (Marple, 1981). Tā, piemēram, elektromagnētisko viļņu izplatīšanos un atstarošanasos gruntīs tiek piedāvāts skaidrot, izmantojot ģeometrisko optiku (Finkel'shteyn, et al., 1986). Līdzīgi šajā laikā tiek pētīta iežu dielektriskās caurlaidības ietekme uz ģeoradara signāla izplatīšanos gruntīs. Tomēr, neskatoties uz plašajiem pētījumiem, pagājušā gadsimta astoņdesmito gadu vidū metodes attīstības ātrums ievērojami samazinās.

Metodes attīstības palēnināšanās saistāma ar vairākiem faktoriem, kurus nosacīti var iedalīt trīs grupās:

- tehnoloģiskās - izmantotajai aparatūrai ir jāveic mērījumi ar nanosekunžu intervālu, iekārtai ir jābūt portatīvai un robustai, tā laika datoru ātrdarbība nav pietiekosa efektīvai datu apstrādei un interpretācijai, iegūto ierakstu kvalitāte nav pietiekama, lai būtu iespējams sniegt viennozīmīgu iegūto rezultātu skaidrojumu (tiek izmantots analogais signālu ieraksts);
- teorētiskās – nav izstrādāta teorija, kas skaidrotu elektromagnētisko signālu izplatīšanos sarežģītās daudzfāzu vidēs, par kādām ir uzskatāmi nogulumieži;
- ar speciālistiem saistītās – aparatūru vairumā gadījumu izstrādā un konstruē elektronikas speciālisti un programmētāji, kas specializējušies aparatūras izstrādē, kā rezultātā uzmanība bieži vien netiek pievērsta jautājumiem, kas saistāmi ar ērtu un efektīvu iekārtas izmantošanu. Tāpat augstskolās netiek sagatavoti speciālisti darbam ar šo aparatūru.

Divdesmitā gadsimta deviņdesmitajos gados straujā datortehnikas attīstība sekmēja arī tālāku radiolokācijas metodes pilnveidi un attīstību. Tāpat metodes attīstību veicina arī vairāku valstu specdienestu interese par metodes pielietošanas iespējām: glābšanas dienesti interesējas par ģeoradaru kā potenciālu instrumentu ar lavīnām apraktu cilvēku meklēšanā; militārie dienesti interesējas par ģeoradara pielietošanas iespējām plastisko mīnu lokalizēšanā; kriminālistikas speciālisti savukārt par iespējām atrast

apbedījumus. Ģeoradars tiek pielietots arī plastikāta vadu meklēšanā un arheoloģiskajos pētījumos.

Atzīmējams, ka metodes attīstību veicināja iespējas pielietot seismiskās izpētes datu apstrādes, programmas radiolokācijas datu apstrādes un interpretācijas laikā. Minētais būtiski palielināja metodes iespējas, jo divdesmitā gadsimta deviņdesmitajos gados seismisko datu apstrādes un interpretācijas metodes bija jau salīdzinoši augstu attīstītas.

Šinī laika posmā ģeoradara iekārtu izstrādi veica salīdzinoši daudz nelielu kolektīvu, kuri, savstarpēji konkurējot, ar informāciju neapmainījās (piemēram, Latvijā pagājušā gadsimta deviņdesmitajos gados pastāvēja trīs šādas kompānijas). Šāda situācija būtiski kavēja aparatūras izstrādi un pilnveidošanu, kā rezultātā datu apstrādes un interpretācijas metodika attīstījās ļoti lēni.

Neskatoties uz iepriekš aprakstītajām problēmām, gan Latvijā, gan pasaulē divdesmitā gadsimta astoņdesmito gadu beigās un deviņdesmito gadu sākumā radiolokācijas metodi sāk arvien plašāk pielietot ģeoloģiskajos pētījumos. Sākotnēji ģeoradars tiek pielietots kūdras izpētē, taču vēlāk salīdzinoši veiksmīgi arī citu derīgo izrakteņu izpētē.

Pagājušā gadsimta deviņdesmito gadu beigās un pēc 2000. gada zinātniskā vidē nonāk salīdzinoši daudz ziņojumu tēžu un publikāciju par radiolokācijas metodi un tās izmantošanas iespējām. Šīs publikācijas veltītas praktiski visām radiolokācijas metodikas jomām – aparatūras izstrādei (Dorn et al., 2012), nepieciešamās programmatūras izstrādei (Ghasemi, Abrishamian, 2007), pielietošanas iespējām (Slowik, 2011; Prinzie et al., 2010) un datu interpretācijai (Negri et al., 2008). Veiktie pētījumi sekmēja to, ka mūsdienās radiolokācijas metode tiek plaši pielietota ģeoloģiskos pētījumos (Girardi, Davis, 2010; Pueyo-Anchuela et al., 2009), arheoloģiskos pētījumos (Damiata et al., 2013; Porsani et al., 2010) un inženierzinātņu pētījumos (Orlando, Slob, 2009; de Castro, Branco, 2003).

Attīstoties radiolokācijas metodei, ir izdotas arī vairākas zinātniskās monogrāfijas, kuras ietver gan metodes teorētisko pamatojumu, gan pielietošanas iespēju aprakstus (Jol, 2009; Izyumov et al., 2008; Burger et al., 2006; Conyers, 2004; Daniels, 2004; Milsom, 2003; Kearey et al., 2002; Reynolds, 1997; Sharma, 1997). Tomēr vairumā gadījumu nodaļas, kas veltītas ģeoradara signāla izplatīšanās raksturošanai gruntī, ir izteikti vienkāršotas un virspusējas, kas bieži vien ģeoradara lietotājiem rada maldīgu priekšstatu par metodes priekšrocībām un trūkumiem.

### **1.2.2. Ģeoloģiskos pētījumos izmantotie ģeoradari**

Mūsdienās komerciāli tiek ražotas salīdzinoši daudz ģeoradara iekārtas, un pie plašāk pielietojamajām iekārtām atzīmējamās uzņēmumu GSSI, MALĀ, GEOTECH un RADAR Systems ražotās iekārtas. Tiek ražotas gan specializētas iekārtas konkrētu uzdevumu veikšanai (piemēram, pazemes komunikāciju meklēšanai), gan universālas iekārtas, kuras, atbilstoši iestatot, var izmantot, lai risinātu visai atšķirīgus uzdevumus.

Kopumā atzīmējams, ka ar dažādu uzņēmumu ražotajiem ģeoradariem ir iespējams iegūt salīdzinoši līdzīgus datus – iegūto radarogrammu kvalitāte un informācijas daudzums, ko tās sniedz par nogulumu slāņiem, ir līdzīgs (Zolotarev, Zelenkov, 2009). Protams, šādi eksperimenti, kuros tiek salīdzināti atšķirīgi ģeoradari, ir veikti salīdzinoši maz, kas liedz veikt kvantitatīvu dažādu ražotāju izstrādāto iekārtu salīdzinājumu. Tomēr vairumā gadījumu ģeoradaru lietotāji atzīmē (Geophysics forum), ka būtiskas atšķirības starp ar dažādu uzņēmumu ražotajiem ģeoradariem iegūtajiem datiem nav konstatējamās.

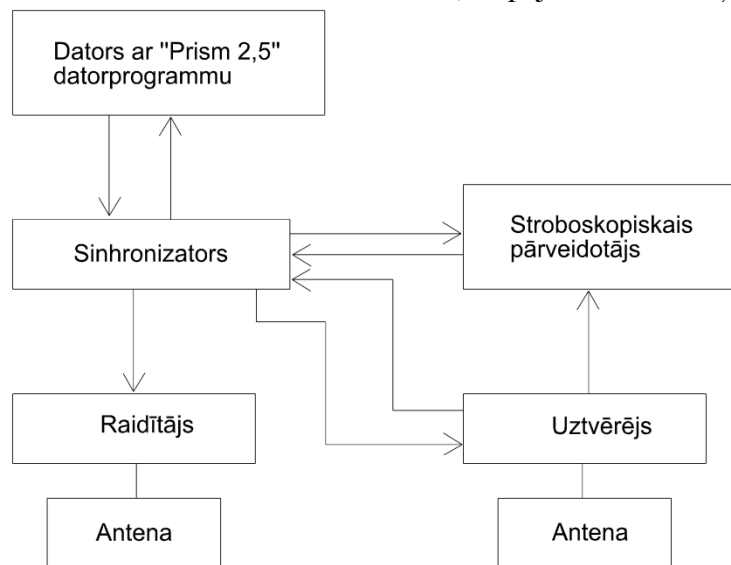


Ņemot vērā iepriekš minēto, nav sagaidāms, ka veiktā pētījuma rezultātus būtiski ietekmēs tas, ar kura ražotāja konstruēto ģeoradaru tiks veikti mērījumi.

Latvijā pētījumos tiek izmantotas dažādu ražotāju izstrādātās iekārtas. Vairāki uzņēmumi veica radiolokācijas izpēti gan ar MALĀ uzņēmuma ražotajiem ģeoradariem, gan ar GSSI uzņēmuma ražotajām iekārtām, bet plašāk tiek pielietoti RADAR Systems uzņēmuma ražotie Zond sērijas ģeoradari.

Atzīmējams, ka Zond sērijas ģeoradaru tehniskie parametri un salīdzinoši plašās ieraksta kontroles iespējas ļauj ar šiem radariem veikt zinātniskas kvalitātes pētījumus (Zolotarev, 2007). Tādēļ turpmāk tiks sniegts Zond sērijas ģeoradara detalizētāks raksturojums.

Galvenās ģeoradars Zond-12e sastāvdaļas ir dators ar atbilstošu programmatūru, sinhronizators, stroboskopiskais pārveidotājs, raidītājs, uztvērējs un antenas (1.3. attēls). Ģeoradars Zond-12e uzskatāms par universāli pielietojamu iekārtu. Tas ir, savienojot iekārtas vadības bloku ar dažādām antenu sistēmām, iespējams veikt atšķirīgus uzdevumus.



1.3. attēls. Ģeoradara uzbūves vienkāršota shēma

Izstrādājis autors, izmantojot Zolotarev, 2007.

Figure 1.3. Simplified scheme of ground penetrating radar

Drawn by the author after Zolotarev, 2007.

Ģeoradars Zond-12e ir impulsveida ģeoradars – veicot radiolokācijas zondēšanu, raidītājantena izstaro „īsu” elektromagnētisko signālu (Zolotarev, 2007). Kā vairums no plašāk izmantotajiem ģeoradariem, ģeoradars Zond 12e radiolokācijas zondēšanas gaitā izstaro pusotru periodu garu elektromagnētisko signālu. Šādus signālus nereti sauc par platjoslas signāliem, un to raksturošanai izmanto tiem atbilstošā frekvenču spektra centrālo frekvenci (Finkel'shteyn, et al., 1994). Rezultātā ģeoradara antenu sistēmas klasificē pēc to izstaroto signālu centrālās frekvences. Ņemot vērā, ka antenu sistēmas centrālā frekvence var būtiski mainīties atkarībā no vides, kurā tā atrodas, parasti tiek norādīta tās izstarotā impulsa centrālā frekvence, tai atrodoties gaisā. Tāpēc turpmāk tekstā, lai identificētu konkrētu antenu sistēmu, tiks pielietots iepriekš aprakstītais princips – piemēram, antenu sistēma, kuras izstarotā signāla centrālā frekvence, tai atrodoties gaisā, ir 300 MHz, tiks saukta par 300 MHz antenu sistēmu.

Kopumā radiolokācijas pētījumos tiek izmantotas antenu sistēmas ar frekvenci intervālā no 10 MHz līdz pat 5 GHz (Jol, 2009). Uzņēmums RADAR Systems izstrādājis 10 dažādas ar ģeoradaru Zond 12e savietojamas antenu sistēmas (1.2. tabula).

1.2. tabula. Ar ģeoradaru Zond 12e savietojamo antenu sistēmu raksturojošie parametri  
Sastādījis autors, izmantojot Zolotarev, 2007.

Table 1.2. Parameters of antenna systems compatible with ground penetrating radar Zond 12e

Compiled by the author after Zolotarev, 2007.

Raidītāja signāla spektra centrālā frekvence gaisā (MHz)	Izmērs (cm)	Svars (kg)	Impulsa spēks (A)	Raidītāja spriegums (V)	Uztvērēja jutība (μV)	Zondēšanas laikā ir ciešs kontakts ar zemes virskārtu
38	150×215×70	7	0,35	200	50	
75	150×110×70	5	0,35	200	50	
100	93×65×21	26	0,35	400	50	X
150	150×430×70	2	0,35	200	50	
300	102×53×12	10	0,35	400	50	X
500	72×33×12	5,5	0,35	400	50	X
750	81×35×67	4	0,25	200	50	
900	52×23,5×12	3	0,35	400	50	X
1500	30×12×11	1,5	0,25	200	50	X
2000	52×23,5×12	1,2	0,25	200	50	X

Kā jau iepriekš minēts, antenu sistēmas izstarotā signāla centrālo frekvenci ietekmē vide, kurā tā atrodas. Sekojoši, novietojot antenu sistēmu uz zemes virskārtas, tās izstarotā signāla centrālā frekvence ir atkarīga no zemes virskārtas elektromagnētiskajām īpašībām. Pie tam, izstarotā signāla centrālā frekvence tiek pazemināta gadījumos, kad zemes virskārtai ir raksturīgas augstas dielektriskās caurlaidības un elektrovadītspējas vērtības (Carr, 2001; Reynolds, 1997). Tā, piemēram, veicot radiolokācijas profilēšanu purvā, ir sagaidāms, ka patiesā izstarotā signāla centrālā frekvence būs mazāka par nomināli norādīto. Tāpat, ņemot vērā to, ka elektromagnētisko viļņu amplitūdas zudumi, tiem izplatoties dielektriķos, ir atkarīgi no to frekvences (1.1.1. nodaļa un 1.1.2. nodaļa), signālam izplatoties gruntī, tā centrālā frekvence samazināsies.

Radiolokācijas zondēšanas laikā ar ģeoradaru Zond 12e jābūt savienotam datoram, kurā ir ierakstīta datorprogramma Prism 2.5. Minētā datorprogramma radiolokācijas zondēšanas laikā nodrošina veikto mērījumu ierakstu \*.sgy datu formāta failā. Tāpat ar minēto programmu iespējams eksportēt datus no \*.sgy datu formāta faila uz \*.txt datu formāta failu. Atzīmējams, ka \*.txt datu formāta failā ierakstītie radiolokācijas mērījumi ir apkopoti datu matricā, kur katru ierakstīto zondējumu veido 512 elektriskā lauka amplitūdas mērījumi. Zinot ieraksta laikā izmantoto laika logu, iespējams aprēķināt katram punktam atbilstošo laika vērtību.

### 1.2.3. Iegūto rezultātu telpiskā izšķirtspēja

Plānojot radiolokācijas pētījumu, kā arī veicot iegūto radiolokācijas datu interpretāciju un sasaistot identificētos atstarojumus ar nogulumu slāņu robežām, būtiski ņemt vērā veikto mērījumu telpisko izšķirtspēju. Pretējā gadījumā var netikt iegūti rezultāti, kurus izmantojot ir iespējams sasniegt pētījuma mērķi.

Apskatot veikto mērījumu telpisko izšķirtspēju, visbiežāk tiek izdalīti divi nozīmīgākie jautājumi – radiālā izšķirtspēja un laterālā izšķirtspēja.

Ar radiālo izšķirtspēju tiek saprasts minimālais attālums starp divām atstarotājevīrsēm, kāds nepieciešams, lai iegūtajā radarogrammā būtu iespējams izšķirt divus atsevišķus ar šīm virsmām saistītus atstarojumus. Proti, ja attālums starp divām robežām būs mazāks par šo kritisko attālumu, atstarojumi no šīm virsmām pārklāsies un iegūtajā radarogrammā būs identificējams tikai viens atstarojums. Ir zināmi vairāki paņēmieni, kā aprēķināt šo kritisko attālumu (Jol, 2009; Reynolds, 1997), taču vairumā gadījumu tiek pieņemts, ka ir iespējams izšķirt atsevišķus atstarojumus, kas saistāmi ar divām salīdzinoši tuvu novietotām robežām, ja attālums starp tām ir vismaz ceturtdaļa no izstarotā signāla centrālajai frekvencei atbilstošā viļņa garuma (1.16. vienādojums).

$$\Delta r \geq \frac{\lambda_c}{4}, \text{ kur} \quad (1.16)$$

$\Delta r$  – kritiskais attālums (m);

$\lambda_c$  – ģeoradara signāla centrālajai frekvencei atbilstošais viļņa garums (m).

Tā, piemēram, veicot radiolokācijas zondēšanu purvā, tika konstatēts, ka ar 300 MHz antenu sistēmu izstarotā ģeoradara signāla centrālā frekvence ir aptuveni 120 MHz (Karušs, Bērziņš, In press). Sekojoši, pieņemot, ka kūdrai raksturīgā  $\epsilon$  ir vienāda ar 75, iegūto mērījumu radiālā izšķirtspēja ir aptuveni septiņi centimetri. Tātad, veicot mērījumus kūdrā ar minēto antenu sistēmu, būs iespējams izšķirt atsevišķus atstarojumus no robežām, ja attālums starp tām būs vismaz septiņi centimetri.

Ar laterālo izšķirtspēju reizēm tiek saprasts objekta minimālais izmērs, kas nepieciešams, lai tas izraisītu reģistrējamu ģeoradara signāla atstarojumu (Reynolds, 1997). Savukārt citi autori ar to saprot zonas, no kuras atstarojas ģeoradara signāls, rādiusu, gadījumā, ja ģeoradara signāls atstarojas no laterāli izturētas robežas (Izyumov et al., 2008). Neskatoties uz atšķirībām apskatītās izšķirtspējas definīcijā, vairums autoru laterālo izšķirtspēju saista ar pirmo Freneļa zonu (Students, 1971). Zonas rādiusa aprēķināšanai dažādi autori piedāvā atšķirīgas formulas (1.17. formula (Jol, 2009); 1.18. formula (Izyumov et al., 2008) 1.19. formula (Reynolds, 1997)).

$$\Delta l = \sqrt{\frac{\lambda_c r}{2}} \quad (1.17)$$

$$\Delta l = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda_c r} \quad (1.18)$$

$$\Delta l \approx \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda r}{2}}, \text{ kur} \quad (1.19)$$

$\Delta l$  – pirmās Freneļa zonas rādiuss (m);

$\lambda_c$  – ģeoradara signāla centrālajai frekvencei atbilstošais viļņa garums (m);

$r$  – attālums līdz atstarotājevīrsmai (m).

Ņemot vērā to, ka šī pētījuma laikā tika analizēti atstarojumi, kas saistāmi ar laterālā virzienā izturētām robežām, laukuma, no kura notikusi ģeoradara signāla atstarošanās, lielums nebūtiski ietekmē iegūto rezultātus un to interpretāciju.

#### **1.2.4. Radiolokācijas mērījumu veikšanas paņēmieni**

Apzinot radiolokācijas metodes pielietojamas iespējas, ir tikuši attīstīti arī dažādi paņēmieni, kā veikt radiolokācijas mērījumus (Jol, 2009; Neal, 2004). Kopumā mērījumu veikšanas paņēmienus iespējams iedalīt divās grupās: mērījumi, kuru laikā tiek reģistrēti ģeoradara signāla atstarojumi, un mērījumi, kuru laikā tiek veikta zondējamās vides caurskatīšana.

Lielākā daļa no pielietotajiem radiolokācijas mērījumu veikšanas paņēmieniem ir pieskaitāmi pie pirmās grupas, kurai piederīgs ir visizplatītākais paņmiens – radiolokācijas profilēšana. Radiolokācijas profilēšanas laikā ģeoradars tiek pārvietots pa izvēlēto profilu, nemainot attālumu starp raidītājantenu un uztvērējantenu. Radiolokācijas profilēšana tiek veikta gan ar antenu sistēmām, kas zondēšanas laikā ir ciešā kontaktā ar zemes virskārtu, gan ar antenu sistēmām, kas ir paceltas virs zemes virskārtas. Vairumā gadījumu ģeoradaru kopā ar antenu sistēmu pārvieto ģeoradara operators, taču ir izstrādāti arī speciāli ģeoradari, kuri tiek pārvietoti, izmantojot automašīnu – ģeoradara vadības bloks atrodas automašīnā, savukārt antenu sistēma ir piestiprināta vai nu mašīnas priekšpusē, vai aizmugurē. Atzīmējams, ka šādi specializēti ģeoradari, kuri tiek pārvietoti, izmantojot automašīnu, ir efektīvi pielietojami gadījumos, ja nepieciešams ierakstīt vairākus kilometrus garus profilus, piemēram, veicot ceļa uzbēruma zondēšanu (Lorenzo et al., 2011).

Atsevišķi izdalāma ir radiolokācijas profilēšana, kuras laikā ģeoradars atrodas lidmašīnā vai kādā citā lidaparātā. Šis uzskatāms par pirmo radiolokācijas mērījumu veikšanas paņmienu, kas tika izmantots (1.2.1. nodaļa), taču mūsdienās tas tiek izmantots tikai specifiskos gadījumos. Šāds mērījumu veikšanas paņmiens salīdzinoši bieži tiek pielietots, veicot segledāju pētījumus Antarktīdā un Grenlandē (MacGregor et al., 2009).

Vēl radiolokācijas mērījumus iespējams veikt, pakāpeniski palielinot attālumu starp raidītājantenu un uztvērējantenu. Mērījumi tiek veikti gan attālinot raidītājantenu no uztvērējantenas, gan attālinot uztvērējantenu no raidītājantenas, gan attālinot abas antenas no izvēlēta sākumpunkta. Šāds mērījumu veikšanas paņmiens parasti tiek pielietots, lai noteiktu ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumu slāņos.

Pie otrās mērījumu grupas pieskaitāmi mērījumu veikšanas paņēmieni, kurus izmantojot, raidītājantena tiek novietota nogulumu parauga vienā pusē, savukārt uztvērējantena otrā pusē. Šis mērījumu veikšanas paņmiens parasti tiek īstenots, izmantojot urbumu ģeoradaru (borehole ground penetrating radar) (Comas et al., 2005b). Attiecīgi pētījumu teritorijā tiek ierīkoti divi urbumi. Viena urbumā tiek ievietota raidītājantena, kamēr otrajā urbumā uztvērējantena. Rezultātā, veicot radiolokācijas zondēšanu, tiek mērīts laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls no raidītājantenas sasniegtu uztvērējantenu, kā arī saņemtā ģeoradara signāla amplitūda. Ar šo mērījumu veikšanas paņmienu ir iespējams identificēt zonas nogulumu slāņos, kurām ir raksturīgs atšķirīgs ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums, kā arī zonas, kuras šķērsojot ģeoradara signālam ir atšķirīgi amplitūdas zudumi.

#### **1.2.5. Ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšana**

Ir zināmas vairākas metodes un paņēmieni, kā noteikt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumu slāņos (Neal, 2004).

Tā, piemēram, to iespējams izdarīt, tieši sasaistot saņemtos radiolokācijas signāla atstarojumus ar urbumos identificētajām nogulumu slāņu robežām (Karušs, Segliņš, 2012; Oliveira et al., 2012). Šāda metode ir salīdzinoši ātri un vienkārši realizējama, taču tai

piemīt būtisks trūkums. Proti, veicot šādu saņemto ģeoradara signālu atstarojumu sasaisti ar urbemos identificētajām nogulumu slāņu robežām, datu interpretators faktiski izvēlas konkrēto atstarojumu izraisītājus. Datu interpretācijas laikā tiek ņemti vērā vispār pieņemti teorētiskie atzinumi par ģeoradara signāla izplatīšanās specifiku dielektriķos, tomēr veiktās interpretācijas korektums ir lielā mērā atkarīgs no datu interpretatora kompetences un personīgās pieredzes. Rezultātā ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma nogulumu slāņos vērtības, kas noteiktas, izmantojot minēto metodiku, ir uzskatāmas par interpretācijas rezultātu nevis objektīvu mērījumu. Minētais nosaka to, ka šāda metodika ir pielietojama tikai gadījumos, kad nav nepieciešams iegūt augstas precizitātes ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumus.

Retāk ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums nogulumu slāņos tiek aprēķināts, pielietojot empīriskā ceļā iegūtas formulas (Vībāns, Karušs, 2013; Karušs et al., 2012), kas apraksta  $\epsilon$  vērtības atkarību no nogulumu fizikālajām īpašībām. Minētās formulas parasti tiek iegūtas laboratorijas apstākļos, veicot ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma nogulumu paraugā mērījumus, mainot kādu no nogulumu parauga fizikālajām īpašībām (Finkel'shteyn, et al., 1994). Tomēr atzīmējams, ka vairumā gadījumu šādas formulas tiek izstrādātas, pieņemot, ka grunti raksturojošo  $\epsilon$  vērtību ietekmē dažas vai tikai viena konkrēta nogulumu fizikālā īpašība (Jol, 2009). Tāpat minētajās formulās netiek ņemta vērā nogulumu dažādu parametru savstarpējā mijiedarbība un tās ietekme uz kopējo  $\epsilon$  vērtību. Ņemot vērā iepriekš minētos pieņēmumus, kas izdarīti šo formulu izstrādes gaitā, atzīmējams, ka to lietošana ir pieļaujama tikai gadījumos, kad nav nepieciešams veikt augstas precizitātes ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumus nogulumu slāņos.

Par daudz precīzākiem ir uzskatāmi tieši ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumi pētījumu teritorijā sastopamajos nogulumu slāņos. Zinātniskajā literatūrā ir aprakstīti vairāki mērījumu veikšanas paņēmieni (Reynolds, 1997), taču tie visi ir pamatoti, izmantojot vienus un tos pašus pieņēmumus par ģeoradara signāla izplatīšanās nogulumu slāņos. Tā, piemēram, šādus mērījumus ir iespējams veikt, pielietojot kopējā viduspunkta metodi (Neal, 2004).

Kopējā viduspunkta metode (CMP) tiek salīdzinoši bieži izmantota dažādu nogulumu radiolokācijas pētījumos (Neal, 2004), tai skaitā purvu nogulumu pētījumos (Comas et al., 2011b; Mustgrave, Binley 2011; Plado et al. 2011; Lowry et al., 2009). Lai būtu iespējams aprēķināt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai, izmantojot CMP, ir nepieciešams veikt divus diskrētus zondējumus. Viens zondējums ir jāveic gan uztvērējantenu, gan raidītājantenu atrodoties vienā punktā, bet otrs – antenām atrodoties dažādos punktos (1.4. attēls).

Pēc mērījumu veikšanas ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai ir iespējams aprēķināt, izmantojot vienādojumu 1.20.

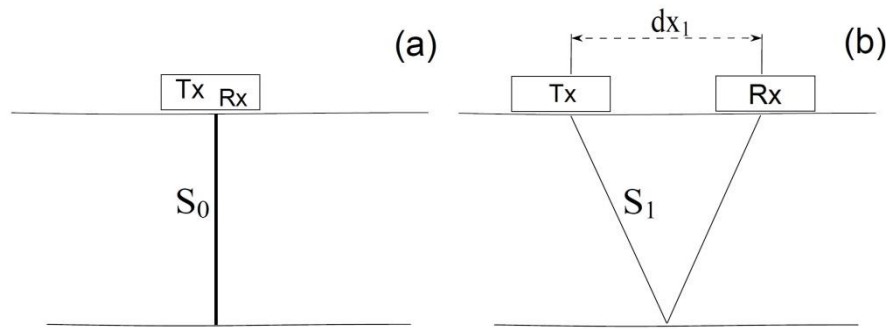
$$v = \sqrt{\frac{\Delta x^2}{t^2 - t_0^2}}, \text{ kur} \quad (1.20)$$

$v$  – ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\Delta x$  – distance starp uztvērējantenu un raidītājantenu (m);

$t$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai signāls noietu trajektoriju  $S$  (s);

$t_0$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai signāls noietu trajektoriju  $S_0$  (s).



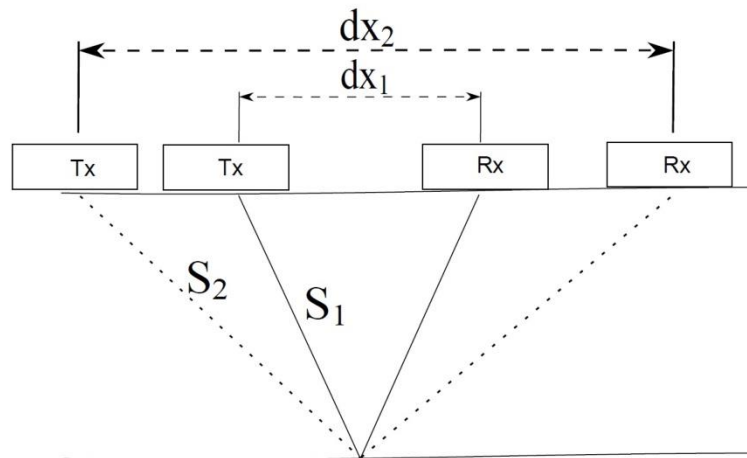
Apzīmējumi:

Tx – raidītājantena transmitter      Rx – uztvērējantena receiver       $S_1$   $S_0$  – signāla noietās trajektorijas trajectory travelled by signal  
 $dx_1$  – antenu savstarpējais attālums distance between antennas

1.4. attēls. Signāla izplatīšanās trajektorija, veicot CMP mērījumus. a) Veicot zondējumu, antenām atrodas vienā punktā, b) veicot zondējumu, antenām atrodas dažādos punktos

Figure 1.4. Propagation trajectory of a signal during CMP measurements. a) When sounding is performed with antennas being located at the same place, b) when sounding is performed with antennas being located in different places

Ņemot vērā to, ka bieži vien raidītājantenas un uztvērējntenas novietošana vienā punktā ir neiespējama, ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu var noteikt, veicot alternatīvu eksperimentu, kura realizācijas laikā tāpat ir nepieciešams veikt divus diskrētus zondējumus. Viens zondējums ir jāveic, uztvērējanteni un raidītājanteni atrodoties attālumā  $dx_1$ , bet otrs zondējums - antenām atrodoties attālumā  $dx_2$  (1.5. attēls).



Apzīmējumi:

Tx – raidītājantena transmitter       $S_1$   $S_2$  – signāla noietās trajektorijas trajectory travelled by signal  
 Rx – uztvērējantena receiver       $dx_1$   $dx_2$  – antenu savstarpējie attālumi distance between antennas

1.5. attēls. Ģeoradara signāla izplatīšanās trajektorija, veicot alternatīvo CMP eksperimentu

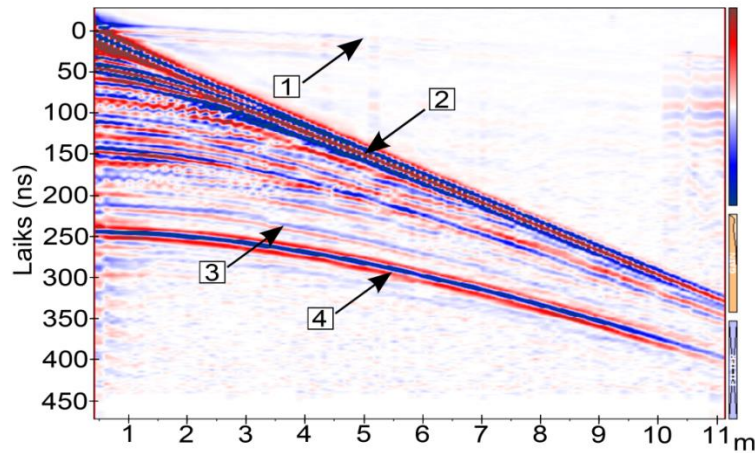
Figure 1.5. Propagation trajectory of a ground penetrating radar signal during alternative CMP experiment

Pēc mērījumu veikšanas ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai ir iespējams aprēķināt, izmantojot vienādojumu 1.21, kas uzskatāms par vienādojuma 1.20 vispārināto formu.

$$v = \sqrt{\frac{\Delta x_2^2 - \Delta x_1^2}{t_2^2 - t_1^2}}, \text{ kur} \quad (1.21)$$

$v$  – ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai ( $\text{m s}^{-1}$ );  
 $\Delta x_1$  – distance starp uztvērējantenu un raidītājantenu pirmajā pozīcijā (m);  
 $\Delta x_2$  – distance starp uztvērējantenu un raidītājantenu otrajā pozīcijā (m);  
 $t_1$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai signāls noietu trajektoriju  $S_1$  (s);  
 $t_2$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai signāls noietu trajektoriju  $S_2$  (s).

Tomēr atzīmējams, ka radiolokācijas metode ir salīdzinoši jūtīga pret apkārtējās vides traucējumiem un ka pat nelielas neprecizitātes mērījumu veikšanas gaitā var būtiski ietekmēt aprēķinu rezultātus. Tāpēc mērījumu veikšanas gaitā tiek veikti vairāki diskrēti zondējumi, antenu sistēmas novietojot dažādos attālumos relatīvi vienu pret otru (Leopold, Volkel, 2003; Parsekian et al., 2010). Mērījumi parasti tiek realizēti pakāpeniski, attālinot uztvērējantenu un raidītājantenu vienu no otras (Parsekian et al., 2010), kā rezultātā tiek iegūta CMP mērījumiem tipiska radarogramma (1.6. attēls). Veicot iegūto mērījumu statistisku analīzi, ir iespējams aprēķināt ticamu patieso ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtību.



1.6. attēls. Cenas tīrelī veiktā CMP eksperimenta laikā ierakstītā radarogramma (Karušs, In press a)

Apzīmējumi: 1 – signāls, kas ceļojis no raidītājantenas uz uztvērējantenu pa gaisu; 2 – signāls, kas ceļojis no raidītājantenas uz uztvērējantenu pa purva virskārtu; 3,4 – atstarojumi, kas saistāmi ar subhorizontālām nogulumu slāņu robežām.

Figure 1.6. A radar image recorded in the Cenas tīrelis site during a CMP experiment (Karušs, In press a)

Legend: 1 – Signal that travelled from transmitter antenna to receiver antenna through air; 2 - Signal that travelled from transmitter antenna to receiver antenna along surface of the ground; 3,4 – reflections that are related to subhorizontal boundaries of sediment layers.

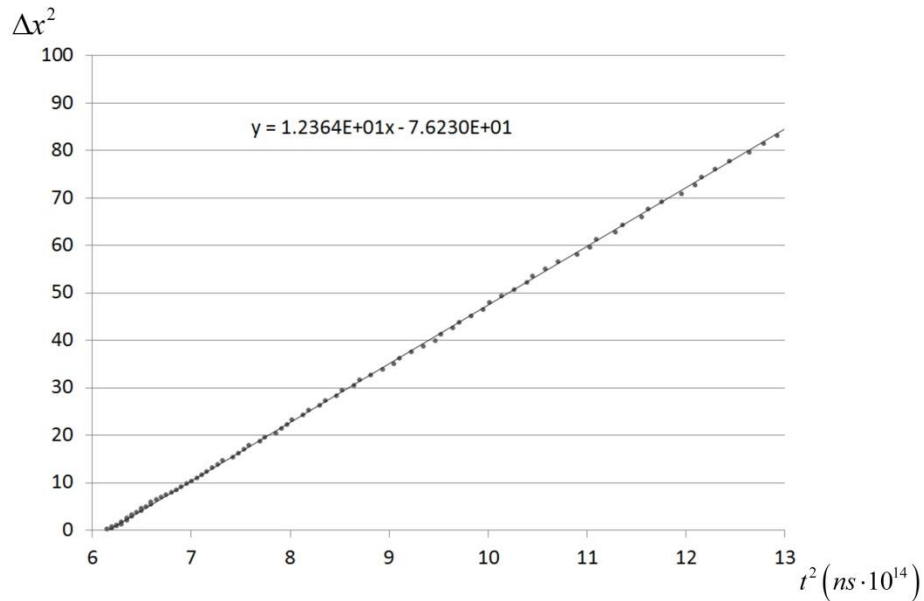
Salīdzinoši bieži CMP mērījumu laikā iegūto datu apstrāde tiek veikta, izmantojot grafisku iegūto datu attēlošanu un analīzi (Karušs, In press a; Parsekian et al. 2010). Pārkārtojot vienādojumu 1.21, redzams, ka tas atbilst taisnes vienādojumam, kur ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai kvadrāts ir taisnes virziena koeficients (1.22)

$$\Delta x_2^2 = v^2 t_2^2 + \Delta x_1^2 - v^2 t_1^2, \text{ kur} \quad (1.22)$$

$v$  – ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai ( $\text{m s}^{-1}$ );  
 $\Delta x_1$  – distance starp uztvērējantenu un raidītājantenu pirmajā pozīcijā (m);

$\Delta x_2$  – distance starp uztvērējantenu un raidītājantenu otrajā pozīcijā (m);  
 $t_1$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai signāls noietu trajektorija  $S_1$  (s);  
 $t_2$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai signāls noietu trajektorija  $S_2$  (s).

Tālāk datus, kas iegūti CMP mērījumu gaitā, atliek uz grafika, kur abscisa un ordināta asis ir attiecīgi laika, pēc kura saņemts signāls, un antenu savstarpējā attāluma vērtības, kāpinātas kvadrātā (1.7. attēls). Iegūtajai punktu kopai tiek aprēķināts (vairumā gadījumu, izmantojot mazāko kvadrātu metodi) lineārās regresijas vienādojums, kura taisnes virziena koeficients ir ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma līdz izvēlētai nogulumu slāņu robežai vērtība kāpināta kvadrātā.



1.7. attēls. CMP mērījumu laikā iegūto datu grafiskas attēlošanas piemērs  
 Figure 1.7. An example of visualising CMP measurement data

Atzīmējams, ka CMP ir arī vairāki trūkumi. Metode ir laikietilpīga, pie tam, izmantojot CMP, ir iespējams aprēķināt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz subhorizontālām robežām. Līdz ar to pētījumu teritorijās, kur sastopamo nogulumu slāņu robežas nav subhorizontālas, metodi nevar izmantot. Kā arī vienādojumi, pēc kuriem tiek veikti aprēķini, ir iegūti, pieņemot, ka ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums nogulumu slāņos horizontālā virzienā nemainās. Iepriekš minētais norāda, ka augstas precizitātes ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumus nogulumu slāņos ar CMP ir iespējams veikt tikai teritorijās, kur sastopamie nogulumu slāņi ir subhorizontāli un laterālā virzienā viendabīgi.

### 1.3. Radiolokācijas pētījumi purvos

Lai būtu iespējams salīdzināt šī pētījuma gaitā iegūtos rezultātus ar rezultātiem, kas iegūti līdzīga rakstura līdz šim veiktajos pētījumos, šī pētījuma sākumposmā tika apkopotas un analizētas zinātniskās publikācijas, kurās aprakstīti purvu pētījumu ar radiolokācijas metodi rezultāti.

Pasaulē purvu pētījumi, izmantojot radiolokācijas metodi, tiek veikti jau kopš 1980. gada un šādus pētījumus var nosacīti iedalīt trīs grupās:



- Pirmajā grupā būtu apvienojami pētījumi, kuros galvenokārt uzmanība tiek pievērsta purva gultnes identificēšanai (Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2011b; Mustgrave, Binley, 2011; Lowry et al., 2009; Comas et al., 2005a; Sheng et al., 2004; Leopold, Volkel, 2003).
- Kā otra grupa izdalāmi pētījumi, kuros uzmanība tiek pievērsta iespējām izdalīt atšķirīgus kūdras slāņus, izmantojot radiolokācijas metodi (Kettridge et al., 2012; Oliveira et al., 2012; Plado et al., 2011; Sass et al., 2010; Kettridge et al., 2008; Holden, 2006; Comas et al., 2004; Holden et al., 2002; Slater, Reeve, 2002; Hanninen, 1992; Helleux, 1990).
- Kā trešā grupa izdalāmi pētījumi, kuros tiek noteikts gāzes daudzums kūdrā, izmantojot noteikto ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu kūdrā (Parsekian et al., 2012; Comas et al., 2011a; Parsekian et al., 2011; Parsekian et al., 2010; Strack, Mierau, 2010; Comas et al., 2008; Comas et al., 2007; Comas, Slater, 2007; Comas et al., 2005b; Comas et al., 2005c).

Atzīmējams, ka pētījumos, kas atbilst kādai no iepriekš minētajām grupām, tiek apskatīti arī jautājumi, kas raksturīgi pētījumiem no pārējām grupām, tomēr uzmanība galvenokārt tiek pievērsta izdalītajai grupai raksturīgajai problemātikai.

Ņemot vērā to, ka līdz šim nav pilnībā izstrādāta teorija, kas skaidrotu elektromagnētisko viļņu izplatīšanos tik sarežģītā daudzfāzu vidē kā kūdra, vispār pieņemta radiolokācijas pētījumu metodika nav izstrādāta. Pētījumu metodika parasti tiek izstrādāta konkrēto pētījumu vajadzībām, ņemot vērā pētījumu autoru pieredzi un vispār pieņemtos radiolokācijas metodes teorijas atzinumus (Neal, 2004). Līdz ar to viena no svarīgākajām radiolokācijas pētījumu daļām ir izmantotā mērījumu veikšanas un datu apstrādes metodika.

Ņemot vērā iepriekš minēto, lietderīgi līdz šim veikto pētījumu apskatu sadalīt divās daļās – purvos īstenoto radiolokācijas pētījumu metodikas apraksts un purvos īstenoto radiolokācijas pētījumu rezultātu apskats.

### **1.3.1. Purvos īstenoto radiolokācijas pētījumu metodikas apskats**

Radiolokācijas pētījumu metodika ir komplekss process, kurā ir iespējams mainīt salīdzinoši daudz parametru, kurus nosacīti var iedalīt divās grupās. Pirmajā grupā var tikt izdalīti parametri, kuri saistīti ar radiolokācijas datu iegūšanu (piemēram, izvēlētas antenu sistēmas centrālā frekvence, izvēlētie ģeoradara iestatījumi radiolokācijas zondēšanas laikā utt.). Otrajā grupā var tikt izdalīti parametri, kuri saistīti ar iegūto ģeofizikālo datu apstrādi un interpretāciju (piemēram, ģeofizikālo datu apstrādes laikā izmantotās matemātiskās funkcijas, iegūto atstarojumu sasaistīšana ar ģeoloģisko griezumumu utt.). Analizējot metodiku, kas pielietota līdz šim veiktajos radiolokācijas pētījumos purvos, tika konstatēts, ka pētījumu autori vairumā gadījumu pievērs uzmanību vieniem un tiem pašiem ar pētījumu metodiku saistītajiem jautājumiem (piemēram, izvēlētas antenu sistēmas centrālā frekvence, pielietotie datu apstrādes matemātiskie filtri, ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšanas metode) (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Kettridge et al., 2008). Atzīmējams, ka arī pētījuma autors savos līdzšinējos pētījumos ir vērsis uzmanību uz šo radiolokācijas metodikas parametru salīdzinoši būtisko ietekmi uz iegūto ģeofizikālo datu kvalitāti (Karušs, Segliņš, 2014; Karušs, Segliņš, 2012). Sekojoši, analizējot metodiku, kas pielietota līdz šim veiktajos radiolokācijas pētījumos purvos, uzmanība galvenokārt tika pievērsta parametriem, kas pēc līdz šim veikto līdzīga rakstura pētījumu autoru domām būtiski ietekmē iegūto ģeofizikālo datu kvalitāti un to veiksmīgu sasaisti ar ģeoloģisko griezumumu.

Pētījumos izmantotās antenu sistēmas:

Kā galvenais faktors, kas ietekmē iegūto radiolokācijas datu kvalitāti, jāmin izmantotā antenu sistēma (Jol, 2009). Atzīmējams, ka līdz šim veiktajos radiolokācijas pētījumos purvos ir izmantotas antenu sistēmas ar centrālajām frekvencēm, kas variē salīdzinoši plašā intervālā. Tā purvu pētījumos ir izmantotas antenu sistēmas ar centrālo frekvenci no 25 MHz (Lowry et al., 2009) līdz pat 900 MHz (Kettridge et al., 2012). Tāpat ir veikti atsevišķi purvu nogulumu monolītu pētījumi laboratorijas apstākļos, kuros ir izmantotas antenu sistēmas ar centrālo frekvenci līdz 1,6 GHz (Parsekian et al., 2012; Comas, Slater, 2007).

Salīdzinoši daudzos pētījumos tiek izmantotas antenu sistēmas ar centrālo frekvenci intervālā no 100 MHz līdz 200 MHz (Van Bellen et al., 2011; Mustgrave, Binley, 2011; Sass et al., 2010; Strack, Mierau, 2010; Comas et al., 2008; Kettridge et al., 2008; Holden, 2006; Comas et al., 2005a; Comas et al., 2005c; Leopold, Volkel, 2003; Holden et al., 2002; Slater, Reeve, 2002). Šajos pētījumos konkrētās antenu sistēmas izvēle vai nu netiek skaidrota vispār (Mustgrave, Binley, 2011; Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2008), vai arī tiek skaidrota ar to, ka tas ir labākais kompromiss starp iegūto mērījumu izšķirtspēju un maksimālo pētījumu dziļumu (Sass et al., 2010; Leopold, Volkel, 2003; Holden et al., 2002; Slater, Reeve, 2002).

Salīdzinoši mazākā skaitā pētījumos ir izmantotas vairākas antenu sistēmas, no kurām vismaz vienai antenu sistēmai centrālā frekvence neatbilst intervālam no 100 MHz līdz 200 MHz (Kettridge et al., 2012; Oliveira et al., 2012; Parsekian et al., 2011; Plado et al., 2011; Sass et al., 2010; Lowry et al., 2009; Comas et al., 2004; Helleux, 1990).

Tomēr līdz šim ir publicēti salīdzinoši maz pētījumi, kuros būtu veikta detalizēta ar dažādām antenu sistēmām iegūto rezultātu savstarpēja salīdzināšana. Kā arī nav apskatīti faktori, kas būtu jāņem vērā, izvēloties antenu sistēmu, veicot pētījumus tieši purvu nogulumos. Līdz ar to antenu sistēmas izvēle tiek balstīta uz vispār pieņemtajiem radiolokācijas metodes teorijas atzinumiem, kā arī pētījuma autoru personīgo pieredzi.

Veiktā literatūras analīze norāda, ka vairumā gadījumu viens no galvenajiem iemesliem, kas ietekmē izmantotās antenu sistēmas izvēli, ir pētniekiem pieejamās aparatūras komplektācija, jo visbiežāk netiek skaidrota konkrētās antenu sistēmas izvēle (Mustgrave, Binley, 2011; Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2008).

Radiolokācijas zondējumu summēšana:

Veicot purvu nogulumu pētījumus ar radiolokācijas metodi, iegūto atstarojumu kvalitātes uzlabošanai tiek salīdzinoši bieži pielietota iegūto zondējumu summēšana (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Strack, Mierau, 2010; Lowry et al., 2009; Comas et al., 2005a; Comas et al., 2004; Nobes, Warner, 1991). Nereti tiek summēti līdz pat 1024 zondējumi (Comas, Slater, 2007). Atzīmējams, ka tikai atsevišķos pētījumos radiolokācijas zondēšanas laikā netiek izmantota zondējumu summēšana.

Zondējumu summēšanas nepieciešamība parasti tiek pamatota ar vajadzību palielināt iegūto atstarojumu amplitūdu (salīdzinoši plaši tiek lietots termins attiecība starp signālu un fona troksni). Tomēr iepriekš minētajam argumentam ir kvalitatīvs raksturs, jo nav iespējams viennozīmīgi definēt, kas ir informatīvie signāli un kas ir fona troksnis, kā arī šo lielumu attiecību. Līdz ar to zondējumu summēšanas vērtības tiek izvēlētas patvaļīgi, ņemot vērā pētījuma autoru pieredzi.

Atzīmējams, ka, palielinot zondējumu summēšanas vērtību, teorētiski samazinās iegūtās radarogrammas izšķirtspēja, jo tiek samazināts zondējumu skaits uz vienu profila garuma vienību (Zolotarev, 2007). Tādējādi pētījumos, kuros ir nepieciešams iegūt detalizētu informāciju par purva nogulumu uzbūvi, būtu jāizmanto pēc iespējas mazāka zondējumu summēšanas vērtība.

Iegūto radiolokācijas mērījumu sasaiste ar ģeoloģisko griezumū:

Lai sasaistītu radiolokācijas pētījumu gaitā iegūtos ģeofizikālos datus ar ģeoloģisko griezumū, nepieciešams noteikt iegūtā radiolokācijas profila garumu (lai būtu iespējama pāreja no iegūtajiem zondējumiem uz garuma mērvienībām), kā arī ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumu slāņos pētījumu teritorijā (lai būtu iespējama pāreja no laika griezuma uz dziļuma mērvienību griezumū).

Iegūtā profila garuma noteikšana ir salīdzinoši vienkāršs uzdevums, kuru, veicot radiolokācijas pētījumu purvos, parasti atrisina vai nu veicot tiešus radiolokācijas profila garuma mērījumus (piemēram, ar mērlenti), vai arī izmantojot ar GPS iekārtu noteiktās koordinātas (Plado et al., 2011).

Lai noteiktu ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu kūdras slāņos, vairumā gadījumu tiek izmantotas divas metodes – korelācija ar urbumu datiem, CMP. Tomēr atsevišķos gadījumos tiek izmantotas arī citas metodes.

Izplatītākā metode ir iegūto atstarojumu sasaiste ar pētījumu teritorijā veiktajos urbumos identificētajām nogulumu slāņu robežām (Oliveira et al., 2012; Van Bellenet al., 2011; Comas et al., 2005a; Slater, Reeve, 2002). Ņemot vērā to, ka, veicot radiolokācijas zondēšanu purvos, parasti tiek iegūts spēcīgs atstarojums, kas saistīts ar purva gultni, ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums purvu nogulumu slāņos tiek noteikts, izmantojot laiku, pēc kura ir saņemts atstarojums no purva gultnes un faktisko purva biezumu, kas ir noteikts, izmantojot urbumu datus. Aprakstītā metode ir salīdzinoši vienkārša, jo vairumā gadījumu atstarojums, kas saistīts ar purva gultni, ir viennozīmīgi identificējams un salīdzinoši spēcīgs, kas ļauj veikt šādu ātruma kalibrāciju arī salīdzinoši dziļos purvos (purvos, kuru dziļums pārsniedz 7m (Comas et al., 2005a)). Aprakstītajai metodei ir divi būtiski trūkumi. Pirmkārt, lai to varētu pielietot, ir nepieciešams veikt tiešus ģeoloģiskos mērījumus pētījumu teritorijā. Otrkārt, šādā veidā tiek noteikts vidējais svērtais ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums nogulumu slāņos un līdz ar to dziļums, no kura saņemti pārējie identificētie atstarojumi, ir noteikts tikai aptuveni.

Ir bijuši mēģinājumi ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma kalibrācijai izmantot iepriekš aprakstīto metodi, kur purva biezuma noteikšanai netiek izmantoti urbumu dati, bet gan purva biezuma vērtības, kas iegūtas, iespiežot kūdras slānī metāla stieni (Sass et al., 2010). Tomēr pētījuma autori atzīst, ka šādi noteiktās purva biezuma vērtības nav precīzas un nevar tikt izmantotas ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšanai purva nogulumos. Kā viens no kļūdu avotiem tiek minēti gadījumi, kad kūdras slānī sastopami nesadalījušies koksnes gabali, kurus nav iespējams caurdurt ar metāla stieni. Kā rezultātā dziļums, kādā atrodas koksnes gabals, tiek interpretēts kā purva biezums.

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšanai plaši tiek pielietota arī CMP (Jol, 2009). CMP tiek izmantota gan kā vienīgā metode ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšanai (Comas et al., 2011b; Mustgrave, Binley, 2011; Lowry et al., 2009), gan kombinējot to ar atstarojumu korelāciju ar urbumos identificēto slāņu robežām (Plado et al., 2011; Comas et al., 2005a; Leopold, Volkel, 2003).

Salīdzinoši bieži, izmantojot CMP metodi, tiek izmantots atstarojums, kas saistīts ar purva gultni (Comas et al., 2011b; Comas et al., 2005a), un rezultātā tiek noteikts vidējais ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums purva nogulumos. Līdz ar to iegūtie rezultāti principiāli neatšķiras no rezultātiem, kas iegūti, veicot ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšanu, izmantojot korelāciju starp iegūtajiem atstarojumiem un urbumu datiem.

Gadījumos, kad iegūtajās radarogrammās ir iespējams izdalīt vairākus atstarojumus, kas saistīti purva nogulumu slāņiem, izmantojot CMP, ir iespējams noteikt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz katrai atstarotālvirsmi, kas saistīta ar identificētajiem atstarojumiem. Šādā veidā ir iespējams iegūt detalizētu informāciju par

ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtībām pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā. Ņemot vērā to, ka bieži vien atstarojumu, kas saistīti ar atsevišķu purva nogulumu slāņu robežām, izdalīšana ir problemātiska, ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšana atsevišķiem purva nogulumu slāņiem tiek veikta salīdzinoši reti (Parsekian et al., 2010; Lowry et al., 2009).

Kā galvenā priekšrocība CMP jāmin tas, ka, lai iegūtu ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtības, nav nepieciešams pētījumu teritorijā veikt tiešus ģeoloģiskus pētījumus. Līdz ar to ir iespējams noteikt purva biezumu, kā arī dziļumu, kādā ieguļ atsevišķu purva nogulumu slāņu robežas, neveicot tiešus ģeoloģiskos pētījumus.

Atsevišķos pētījumos, lai sasaistītu iegūtos atstarojumus ar ģeoloģisko griezumu, tiek izmantotas iepriekšējos pētījumos noteiktās ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtības, taču šāda metode uzskatāma par ļoti neprecīzu, jo  $\epsilon$  vērtības purvu nogulumiem variē salīdzinoši plašā intervālā (Neal, 2004).

Radarogrammu apstrādes laikā izmantotie digitālie filtri:

Ņemot vērā to, ka iegūto ģeofizikālo datu apstrāde var būtiski ietekmēt to tālāko interpretāciju (Jol, 2009), svarīgi atrast optimālāko radarogrammu apstrādes metodiku. Zinātniskajā literatūrā bieži vien tiek pausts viedoklis, ka, apstrādājot iegūtās radarogrammas, galvenokārt jāizvairās no pārlietu spēcīgas iegūto datu apstrādes ar dažādiem signālu filtriem (Jol, 2009), jo tādā gadījumā iegūtajās radarogrammās var parādīties signāli, kas ir saistīti ar dažādu signālu filtru darbības summāro rezultātu.

Vairumā purvu nogulumu pētījumos iegūto radarogrammu apstrādes laikā tiek izmantoti salīdzinoši maz digitālie signālu filtri (Parsekian et al., 2010; Comas et al., 2007). Tas skaidrojams ar to, ka iegūtie ģeofizikālie dati vairumā gadījumu ir augstas kvalitātes un iegūtajās radarogrammās vērojami tikai atsevišķi neinformatīvi signāli.

Purvu nogulumu pētījumos iegūto radarogrammu apstrādes laikā praktiski visos pētījumos iegūtie atstarojumi tiek pastiprināti proporcionāli laikam, pēc kura tie ir saņemti (Oliveira et al., 2012; Parsekian et al., 2011; Parsekian et al., 2010; Comas et al., 2008; Comas et al., 2007; Comas et al., 2005c). Atsevišķos gadījumos pētījumu autori norāda, ka pastiprinājums izvēlēts kā atstarojuma saņemšanas laika funkcija, un norāda funkcijas veidu (Parsekian et al., 2011; Parsekian et al., 2010). Taču vairumā gadījumu nav norādīti parametri, kas ir noteikuši izvēlētajā pastiprinājuma lielumu (Oliveira et al., 2012; Comas et al., 2007; Comas et al., 2005c).

Atzīmējams, ka iegūto atstarojumu amplitūda var tikt izmantota, lai raksturotu pētījumu teritorijā sastopamo nogulumu elektromagnētiskās īpašības. Tāpēc, lai netiktu zaudēta iespēja salīdzināt radarogrammās identificēto atstarojumu amplitūdas, nav pieļaujama patvaļīga signālu pastiprināšana (Jol, 2009; Reynolds, 1997).

Salīdzinoši bieži tiek izmantots „dewow” vai „wow” signālu filtrs, kuru izmantojot tiek dzēsti signāli ar salīdzinoši zemu frekvenci (Kettridge et al., 2012; Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2011b; Comas et al., 2005a). Vairumā gadījumu nepieciešamība pielietot „wow” filtru tiek skaidrota ar to, ka iegūtajās radarogrammās sastopami zemas frekvences neinformatīvi signāli, kurus izstaro ģeoradara vadības bloks (Kettridge et al., 2012; Comas et al., 2005a).

Tāpat atsevišķos pētījumos, apstrādājot iegūtās radarogrammas, tiek izmantoti frekvenču filtri (izmantojot ģeofizikālo datu apstrādes programmās iestrādātās matemātiskās apstrādes funkcijas, no iegūtajiem datiem tiek dzēsti signāli ar noteiktām frekvencēm (Jol, 2009)), taču frekvenču filtra apraksts un dzēsto frekvenču vērtības vairumā gadījumu netiek sniegtas (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Kettridge et al., 2008).

Nereti radarogrammu apstrādes laikā tiek pielietoti arī dažādi migrācijas algoritmi (piemēram, Kiršhofa migrācija), ko autori pamato ar nepieciešamību dzēst „hiperboliskās

difrakcijas” (Jol, 2009), kas saistītas ar lokāliem objektiem (Oliveira et al., 2012; Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2011b). Jāpiezīmē, ka šo algoritmu pielietošanas lietderība ir apšaubāma, jo radarogrammās, kas nav apstrādātas ar migrācijas algoritmiem, ir iespējams vieglāk identificēt ar lokāliem objektiem saistītus atstarojumus.

### 1.3.2. Purvos īstenoto radiolokācijas pētījumu rezultātu apskats

Jau kopš pirmajiem mēģinājumiem pielietot radiolokācijas metodi purvu nogulumu pētījumos ir iegūti augstas kvalitātes ģeofizikālie dati (Nobes, Warner, 1991). Pirmajos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi galvenokārt tika analizētas iespējas iegūt atstarojumu no purva gultnes, bet, metodei attīstoties, uzmanība tika pievērsta gan iespējām izdalīt atsevišķus purvu nogulumu slāņus, gan iespējām noteikt purvu nogulumu īpašības (Nobes, Warner, 1991).

Analizējot līdz šim veiktos radiolokācijas pētījumus purvos, uzmanība tika pievērsta svarīgākajiem iegūtajiem rezultātiem un izdarītajiem secinājumiem.

Maksimālais izpētes dziļums:

Maksimālais izpētes dziļums galvenokārt ir atkarīgs no pētījumā izmantotās antenu sistēmas centrālās frekvences, kā arī izmantotās radiolokācijas iekārtas raidītā signāla amplitūdas (1.1.1. nodaļa). Tomēr nozīmīgas ir arī pētījumu teritorija sastopamo nogulumu slāņu elektromagnētiskās īpašības. Ņemot vērā to, ka purvu nogulumiem raksturīga salīdzinoši zema elektrovadītspēja (Jol, 2009), ir sagaidāms, ka maksimālais izpētes dziļums būs vairāki metri (1.1.1. nodaļa).

Pirmajos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi uzmanība galvenokārt tika pievērsta atstarojumam, kas saistīts ar purva gultni, līdz ar to bieži vien pētījuma mērķis bija iegūt ar purva gultni saistīto atstarojumu no pēc iespējas lielāka dziļuma. Vairumā pētījumu, kas tika veikti laika posmā no 1980 līdz 1990 gadam, tika konstatēts, ka atstarojumu, kas saistīts ar purva gultni, ir iespējams iegūt, ja purva dziļums nepārsniedz septiņus līdz astoņus metrus (Chernetsov et al., 1987; Lowe, 1985; Remotec, 1982).

Turpmākajos gados maksimālais izpētes dziļums ir nedaudz palielinājies. Atsevišķos gadījumos, izmantojot antenu sistēmas ar salīdzinoši zemu centrālo frekvenci (25 MHz, 50 MHz), ir iegūti atstarojumi, kas saistīti ar purva gultni, kas iegūti 10 līdz 12 metrus lielā dziļumā (Comas et al., 2011b; Lowry et al., 2009; Comas et al., 2005a).

Protams, pētījumos, kuros izmantotas antenu sistēmas ar augstāku centrālo frekvenci, maksimālais izpētes dziļums ir mazāks (1.1.1. nodaļa). Tā, piemēram, pētījumos, kuros izmantota antenu sistēma ar centrālo frekvenci, kas tuva 400 MHz, ir izdevies iegūt radiolokācijas signāla atstarojumus no dziļuma, kas nepārsniedz trīs metrus (Parsekian et al., 2011). Savukārt Igaunijā veiktajos purvu pētījumos, izmantojot antenu sistēmu ar centrālo frekvenci 300 MHz, nav izdevies iegūt atstarojumus no dziļuma, kas pārsniedz četrus metrus (Plado et al., 2011).

Veicot purvu nogulumu pētījumus ar radiolokācijas metodi, jāņem vērā, ka dažāda tipa purviem raksturīgas dažādas elektromagnētiskās īpašības, un līdz ar to maksimālais izpētes dziļums dažādos purvos var būt atšķirīgs.

Iegūto radiolokācijas mērījumu precizitāte:

Runājot par iegūto mērījumu precizitāti, apkopoto pētījumu autori vairumā gadījumu min vertikālo izšķirtspēju, kas raksturīga izmantotajai antenu sistēmai (Oliveira et al., 2012; Plado et al., 2011; Comas et al., 2005a). Proti, no viļņu fizikas pamatprincipiem izriet, ka, ja attālums starp divām atstarotārvirsmām būs mazāks par vienu ceturto daļu no viļņa garuma, atstarojumi no abām virsmām pārklāsies (Neal, 2004).

Rezultātā iegūto datu interpretācijas gaitā tiks identificēta tikai viena atstarotārvirsmā. Sekojoši, izmantojot pielietotās antenu sistēmas centrālo frekvenci, ir iespējams aprēķināt tās teorētisko vertikālo izšķirtspēju. Atzīmējams, ka vertikālā izšķirtspēja neļauj novērtēt ne aprēķināto ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma precizitāti, ne precizitāti, ar kādu noteikts dziļums, no kura saņemts atstarojums, kas vairumā pētījumu ir daudz būtiskākas par vertikālo izšķirtspēju.

Atsevišķās publikācijās autori ir analizējuši attāluma starp atsevišķiem zondējumiem ietekmi uz iegūtajiem datiem (Holden, 2006). Tomēr izdarītajiem secinājumiem ir drīzāk kvalitatīvs nekā kvantitatīvs raksturs.

Tikai dažos gadījumos pētījumu autori ir analizējuši aprēķināto ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma precizitāti un precizitāti, ar kādu noteikts dziļums, no kura saņemts atstarojums (Parsekian et al., 2010; Strack, Mierau, 2010). Minētajos pētījumos tika veikta iegūto aprēķinu un mērījumu statistiska analīze.

Kopumā atzīmējams, ka visai neliela vērtība tiek piešķirta precizitātei, ar kādu ir noteikti dziļumi, no kuriem ir saņemti identificētie atstarojumi. Tāpat uzmanība vairumā gadījumu nav pievērsta ne iegūto mērījumu atkārtojamībai, ne faktoriem, kas varētu ietekmēt veikto aprēķinu precizitāti. Iepriekš minētais daļēji skaidrojams ar to, ka purva nelīdzenā virsma un salīdzinoši lielā purvu nogulumu heterogenitāte sarežģī iegūto mērījumu precizitātes novērtēšanu.

Purvu nogulumu īpašības, kas ietekmē  $\epsilon$  vērtību:

Apkopojot purvu nogulumu pētījumus, kuros izmantota radiolokācijas metode, tika konstatēts, ka kopumā dominē viedoklis, ka nogulumu  $\epsilon$  vērtību galvenokārt nosaka mitruma daudzums nogulumos (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Kettridge et al., 2008; Holden et al., 2002). Viedoklis tiek pamatots ar vispār pieņemtajiem teorētiskajiem atzinumiem, ka ūdenim raksturīgā  $\epsilon$  ir ievērojami lielāka nekā jebkuram nogulumu veidam raksturīgā  $\epsilon$  (Jol, 2009). Piemēram, bieži vien iegūtie atstarojumi tiek saistīti ar slāņu, kuriem ir atšķirīgas nogulumu blīvuma vai sadalīšanās pakāpes vērtības, robežām, taču kā iemesls tam, ka ir izveidojies atstarojums, tiek minētas atšķirīgas nogulumu mitruma daudzuma vērtības (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Holden et al., 2002; Slater, Reeve, 2002).

Šāds viedoklis ir uzskatāms par korektu, taču visu purvu nogulumos iegūto atstarojumu skaidrošana tikai un vienīgi ar mitruma daudzuma izmaiņām griezumā nav korekta, jo ir sastopami pētījumi, kuros iegūtie rezultāti ir pretrunā ar šo apgalvojumu.

Tāpat salīdzinoši bieži kā viena no galvenajām īpašībām, kas nosaka nogulumu  $\epsilon$ , tiek minēta humifikācijas pakāpe (Kettridge et al., 2008; Slater, Reeve, 2002).

Kopumā, kā galvenās īpašības, kas nosaka purva nogulumu  $\epsilon$ , tiek minēts arī blīvums, pelnainība, kūdras botāniskais sastāvs, palielināts nesadalījušās koksnes daudzums (Kettridge et al., 2012; Slater, Reeve, 2002; Helleux, 1990). Tomēr vairumā gadījumu, identificējot purvu nogulumu īpašības, kas galvenokārt nosaka  $\epsilon$ , autori atsaucas uz salīdzinoši seniem pētījumiem, un gadījumos, kad pašu iegūtie rezultāti neapstiprina sākotnējos pieņēmumus, neidentificē nogulumu īpašību robežas, kas atbilstu iegūtajiem atstarojumiem (Kettridge et al., 2012; Slater, Reeve, 2002).

Iespējas izdalīt atsevišķus purvu nogulumu slāņus:

Jau pirmajos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi tika konstatēts, ka bez spēcīga atstarojuma no purva gultnes radarogrammā ir iespējams identificēt vairākus atstarojumus, kas visticamāk ir saistīti ar robežām starp purvu nogulumu slāņiem ar atšķirīgam elektromagnētiskajām īpašībām (Chernetsov et al., 1987).

Nereti iegūtajās radarogrammās, neskaitot atstarojumu, kas saistīts ar purva gultni, tiek identificēti salīdzinoši spēcīgi atstarojumi, ko pētījumu autori saista ar kūdras slāņa un ezera nogulumu robežu (Lowry et al., 2009; Comas et al., 2005a; Chernetsov et al.,

1987). Tomēr vairākos pētījumos ar urbumos identificēto kūdras slāņa un ezera nogulumu slāņa robežu saistīto atstarojumu nav izdevies identificēt (Comas et al., 2004). Šajos gadījumos pētījumu autori ir saistījuši minēto robežu ar šķietami krasu iekšējo atstarojumu (atstarojumi, kas saistīti ar lokālām nogulumu īpašību izmaiņām,) amplitūdas un rakstura izmaiņu. Tomēr šāda interpretācija nevar tikt uzskatīta par viennozīmīgu, jo šajos pētījumos, salīdzinot iekšējo atstarojumu amplitūdu, nav ņemti vērā radiolokācijas signāla amplitūdas zudumi, tam izplatoties lielākos dziļumos.

Tāpat vairākos pētījumos ir minēts, ka ir izdevies identificēt atstarojumu, kas saistāms ar akrotelma – katotelma robežu (Lowry et al., 2009; Holden et al., 2002). Jāpiezīmē, ka atsevišķos pētījumos ir minēts, ka akrotelma – katotelma robežu radarogrammās viennozīmīgi identificēt nav iespējams (Plado et al., 2011).

Neskaitot iepriekš aprakstītās robežas un ar tām saistītos atstarojumus, vairākos pētījumos ir tikuši identificēti atstarojumi, kurus pētījumu autoriem nav izdevies sasaistīt ar pētījumu teritorijā veiktajos urbumos identificētajām nogulumu slāņu robežām (Comas et al., 2011b; Leopold, Volkel, 2003; Holden et al., 2002). Minētie atstarojumi vairumā gadījumu tiek skaidroti ar kūdras slāņa stratigrāfiju, neprecizējot, kuru kūdras īpašību izmaiņas saistāmas ar šiem signāliem.

Salīdzinoši bieži pētījumu autori radarogrammu analīzes un interpretācijas gaitā ir pielietojuši secību stratigrāfijas principus (Oliveira et al., 2012; Kettridge et al., 2008; Leopold, Volkel, 2003). Secību stratigrāfijas principu izmantošanas korektumu pētījumu autori pamato ar to, ka gan veicot seismisko izpēti, gan radiolokācijas pētījumus, ģeofizikālie mērījumi tiek veikti, izmantojot viļņus. Tomēr atzīmējams, ka seismiskajā izpētē tiek izmantoti mehāniskie viļņi, savukārt radiolokācijas pētījumos tiek izmantoti elektromagnētiskie viļņi, kas nevar tikt uzskatīti par analogiskiem. Neskatoties uz to, ka gan mehānisko viļņu izplatīšanos, gan elektromagnētisko viļņu izplatīšanos var aprakstīt, izmantojot viļņu fiziku, to izplatīšanos ietekmē dažādas nogulumu īpašības. Tāpat nav korekta tieša secību stratigrāfijas principu pielietošana radiolokācijas pētījumos, jo šī metode ir izstrādāta pētījumiem, kuru mērogs vairākus desmitus reižu pārsniedz radiolokācijas pētījumu mērogu. Līdz ar to, neskatoties uz to, ka atsevišķos gadījumos iegūto datu interpretācija, kas veikta, izmantojot secību stratigrāfijas principus, ir šķietami korekta, iegūto rezultātu patiesums ir apšaubāms.

Atzīmējams, ka ir veikti arī vairāki pētījumi ar mērķi identificēt purvu nogulumu īpašības, kuru izmaiņas saistāmas ar iegūtajiem atstarojumiem (Tolonen et al., 1984). Tā, piemēram, plašus pētījumus veica Tolonens 1984. gadā (Tolonen et al., 1984). Šajā pētījumā iegūtie rezultāti liecina par to, ka identificētie atstarojumi var būt saistīti ar dažādu nogulumu īpašību izmaiņām griezumā (1.3. tabula). Tāpat pētījuma autori norāda, ka, lai būtu iespējams identificēt atstarojumu, kas saistāms ar robežu starp slāņiem ar dažādu humifikācijas pakāpi, tās atšķirībai starp slāņiem jābūt vismaz divas klases pēc von Posta skalas.

1.3. tabula. Ģeoradara signāla atstarojumu korelācija ar identificētajām kūdras īpašību izmaiņām griezumā (Tolonen et al., 1984)

Table 1.3. Correlation of georadar signal reflections with identified changes of peat properties (Tolonen et al., 1984)

Robežas tips	Identificēta (%)	Neidentificēta (%)	Kopējais analizēto gadījumu skaits
Mitruma daudzums	71	29	55
Sadalīšanās pakāpe	78	22	23
Kūdras tips	58	42	43

Tomēr atsevišķu pētījumu autori norāda uz to, ka iegūtie atstarojumi nav saistāmi ne ar humifikācijas pakāpes, ne blīvuma, ne mitruma daudzuma, ne botāniskā sastāva, ne kādas no minēto parametru kombinācijas izmaiņām griezumā (Sass et al., 2010; Remotec, 1982).

Kopumā, analizējot apkopotos radiolokācijas pētījumus, jāatzīst, ka vairumā gadījumu ir noteikts vidējais svērtais ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums griezumā. Līdz ar to iegūtās dziļuma vērtības ir kļūdainas. Tomēr vairumā pētījumu tiek pieņemts, ka ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums atsevišķos slāņos maz atšķiras no vidējā ģeoradara signāla ātruma griezumā, un līdz ar to aprēķinātie dziļumi aptuveni atbilst patiesajiem dziļumiem, no kuriem ir saņemti radarogrammās identificējamie atstarojumi (Oliveira et al., 2012; Sass et al., 2010; Comas et al., 2005a; Slater, Reeve, 2002). Tāpat iepriekš minētajos pētījumos iegūtie atstarojumi tiek saistīti ar purvu nogulumu slāņu robežām, kuru dziļums atšķiras no iegūtajiem atstarojumiem atbilstošā dziļuma, kas aprēķināts, izmantojot vidējo ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu griezumā. Šādas patvaļīgas atstarojumu sasaistīšanas ar slāņu robežām korektums tiek pamatots ar iepriekš aprakstīto neprecizitāti. Minētā metodika nevar tikt uzskatīta par pietiekoši precīzu pētījumiem, kuru mērķis ir sasaistīt iegūtos atstarojumus ar purvu nogulumu slāņu robežām, līdz ar to šajos pētījumos iegūtie rezultāti ir uzskatāmi par informatīviem, bet ne piemērotiem kvantitatīvai analīzei.

Purvu nogulumu fāzu tilpuma attiecību noteikšanas iespējas, izmantojot iegūtās radarogrammas:

Tāpat līdz šim ir veikti salīdzinoši daudzi pētījumi ar mērķi noteikt gāzu daudzumu purvu nogulumos. Šajos pētījumos tiek izmantotas divas pieejas.

Pirmajā gadījumā tiek izmantota analogija ar seismiskajiem mērījumiem (Comas et al., 2005b). Tiek pieņemts, ka analogiski seismiskajiem viļņiem, elektromagnētiskie viļņi tiek ievērojami izkliedēti zonās, kur sastopami gāzes burbuļi. Minētajos pētījumos pārliecinoši rezultāti nav iegūti, un pētījumu autori turpmākos eksperimentos šo metodi nepielieto.

Otrajā gadījumā tiek izmantotas noteiktās ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtības purva nogulumos – noteiktā  $\epsilon$  (Strack, Mierau, 2010; Comas et al., 2008; Comas et al., 2007). Lai aprēķinātu gāzes daudzumu purva nogulumos, tiek izmantotas empīriski iegūtās formulas dielektriskās caurlaidības aprēķināšanai. Šīs formulas balstās uz hipotēzi, ka, summējot atsevišķu nogulumu fāzu  $\epsilon$  vērtības proporcionāli fāzu aizņemtajam tilpumam, tiek iegūta nogulumu summārā  $\epsilon$  vērtība. Tā piemēram, tiek pieņemts, ka purva nogulumu ir trīs fāzu maisījums – augu atliekas, ūdens un gāze. Ievietojot formulā dažādas fāzu attiecības, tiek iegūta dielektriskās caurlaidības vērtība, kas sakrīt ar eksperimentāli noteikto. Šādos aprēķinos ļoti plaši tiek izmantots CRIM modelis (Strack, Mierau, 2010; Comas et al., 2008). Atzīmējams, ka minētā pieeja ir korekta gadījumā, ja purvu nogulumu  $\epsilon$  nosaka praktiski tikai mitruma daudzums nogulumos.

Atzīmējams, ka, lai apstiprinātu aprakstītās metodes korektumu, ir veikti vairāki pētījumi laboratorijas apstākļos, izmantojot kūdras monolītus un antenu sistēmas ar augstu centrālo frekvenci (Parsekian et al., 2012; Comas, Slater, 2007). Šajos pētījumos tika izmantotas vairākas metodes, ar kuru palīdzību tika mainīta fāzu tilpuma daļu attiecība. Tā, piemēram, palielinot monolīta temperatūru, tika prognozēta gāzes pastiprināta izdalīšanās un līdz ar to tilpuma daļas palielināšanās (Comas, Slater, 2007). Savukārt, ievietojot kūdras monolītu noslēgtā traukā un palielinot gaisa spiedienu, tika prognozēta gāzes burbuļu saspiešanās – gāzes tilpuma daļas samazināšanās (Parsekian et al., 2012). Šajos eksperimentos iegūtie rezultāti liecina par to, ka gāzes fāzes tilpuma daļas izmaiņas ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumos. Tomēr atsevišķos gadījumos tika konstatēts, ka rezultāti atšķiras dažādiem kūdras monolītiem, kas liecina par to, ka



ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu kūdrā ietekmē ne tikai mitruma daudzums (Parsekian et al., 2012).

Vairākos pētījumos ir minēts, ka iegūtie rezultāti nav viennozīmīgi, un bieži vien gāzes daudzuma vērtības, kas noteiktas, izmantojot ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu nogulumos, atšķiras no tiešajiem gāzes daudzuma mērījumiem purvā (Strack, Mierau, 2010). Tāpat dažos pētījumos ir konstatēts, ka, veicot CMP mērījumus dažādos virzienos, iegūtie rezultāti atšķiras (Comas et al., 2007). Pētījuma autori to skaidro ar kūdras heterogenitāti, bet tādā gadījumā hipotēze, ka ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu kūdrā ietekmē tikai mitruma daudzums, nav pareiza.

Vairākos pētījumos tiek norādīts, ka iegūtie rezultāti ir ar ļoti augstu precizitāti un, izmantojot noteikto  $\epsilon$ , ir iespējams analizēt dažādu ārēju faktoru ietekmi (atmosfēras spiediens, gadalaiks, utt.) uz gāzes daudzuma izmaiņām nogulumos (Comas et al., 2011a; Parsekian et al., 2010; Comas et al., 2008). Tomēr nereti tiek pausts viedoklis, ka, izmantojot šādu metodi, var analizēt tikai gāzes relatīvo daudzumu nogulumos, nevis absolūtās tilpuma vērtības (Comas et al., 2011a).

## 2. Materiāli un metodes

Lai sasniegtu šī pētījuma sākumā izvirzīto mērķi un izpildīt visus izvirzītos uzdevumus, pētījuma sākumposmā bija nepieciešams pilnveidot un atsevišķos gadījumos arī izstrādāt pētījumu metodiku.

Šī pētījumu metodika tika izvēlēta, ņemot vērā citu autoru līdzīgos pētījumos izmantotos paņēmienus un metodiku (1.3.1. nodaļa), kā arī darba autora līdzšinējos pētījumos iegūtos rezultātus (Karušs, 2014a; Bērziņš, Karušs, 2014a; Bērziņš, Karušs, 2014b; Karušs, 2013; Karušs, Segliņš, 2013b; Karušs, 2010a). Nepieciešamo datu ieguves un apstrādes aspekti, kas nav tikuši apskatīti iepriekšējos pētījumos, tika izstrādāti šī pētījuma sākumposmā.

Savukārt sākotnējā un plašāk zināmā radiolokācijas pētījumu metodika (1.3.1. nodaļa) darba gaitā tika pilnveidota, izmantojot rezultātus, kas tika iegūti detalizētu pētījumu objektā Cenas tīrelī (4.1. nodaļa), un atkārtoti verificēta un pārbaudīta Dzelves purvā un Ķūķu purvā (Vlads, Karušs, 2014; Karušs, Vībāns, 2013).

### 2.1. Ģeofizikālo datu korelācija ar purvu nogulumu īpašībām

Purvainās teritorijās ierakstītajās radarogrammās visbiežāk ir iespējams identificēt salīdzinoši daudz atstarojumu, kas saistīti ar kūdras īpašību maiņu pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā (1.3.2. nodaļa). Ierakstītajās radarogrammās ir iespējams identificēt gan atstarojumus, kas saistāmi ar lokāliem objektiem, piemēram, celmiem un koku saknēm (Jol, 2009), gan atstarojumus, kas ir izsekojami plašā teritorijā un ir saistāmi ar kūdras slāņu, kam ir atšķirīgas elektromagnētiskās īpašības, robežām (Karušs, Segliņš, 2013a).

Ņemot vērā veiktā pētījuma mērķi, analizējot iegūtās radarogrammas, uzmanība galvenokārt tika pievērsta subhorizontāliem atstarojumiem, kas izsekojami visā radarogrammā vai vismaz daļā no tās.

Lai būtu iespējams sasaistīt šāda veida radiolokācijas signāla atstarojumus ar nogulumu fizikālajām īpašībām, nepieciešams iegūt detalizētu informāciju par nogulumu fizikālo īpašību maiņu ģeoloģiskajā griezumā. Būtiski ir iegūt detalizētu informāciju ne tikai par nogulumu fizikālo īpašību maiņu vertikālā virzienā līdz purva gultnei, bet arī laterālā virzienā visā radiolokācijas profila garumā. Atzīmējams, ka, ņemot vērā to, ka detalizēti analizēti tika subhorizontāli atstarojumi, kas izsekojami vismaz daļā no ierakstītās radarogrammas, tika pieņemts, ka ar minētajiem atstarojumiem saistītās nogulumu īpašību robežas būs izturētas laterālā virzienā.

Rezultātā ar augstu detalitāti tika iegūta informācija par nogulumu fizikālo īpašību maiņu vertikālā virzienā, savukārt informācija laterālā virzienā tika iegūta tikai atsevišķos punktos. Minētais tika realizēts, izmantojot ģeoloģiskos urbumus – uz izvēlētajiem radiolokācijas profiliem tika ierīkoti divi vai atsevišķos gadījumos vairāki ģeoloģiskie urbumi, kas sniedzās līdz purva gultnei (2.4.1. nodaļa).

### 2.2. Pētījuma objektu izvēle un radiolokācijas profilu novietojums

Disertācijas izstrādes sākumposmā, izmantojot VSIA „Latvijas Vides ģeoloģijas un meteoroloģijas centra” fondu materiālus un „LU ĢZZF WMS” karšu datubāzi, tika izvēlēti purvi, kuros varētu tikt veikti radiolokācijas mērījumi. Mērījumus tika izvēlēts veikt augstā tipa vai pārejas tipa purvos, jo, ņemot vērā to, ka zemo purvu ģeoloģiskā uzbūve ir salīdzinoši sarežģīta, iegūto radiolokācijas mērījumu verifikācija būtu komplicēta. Tālāk,

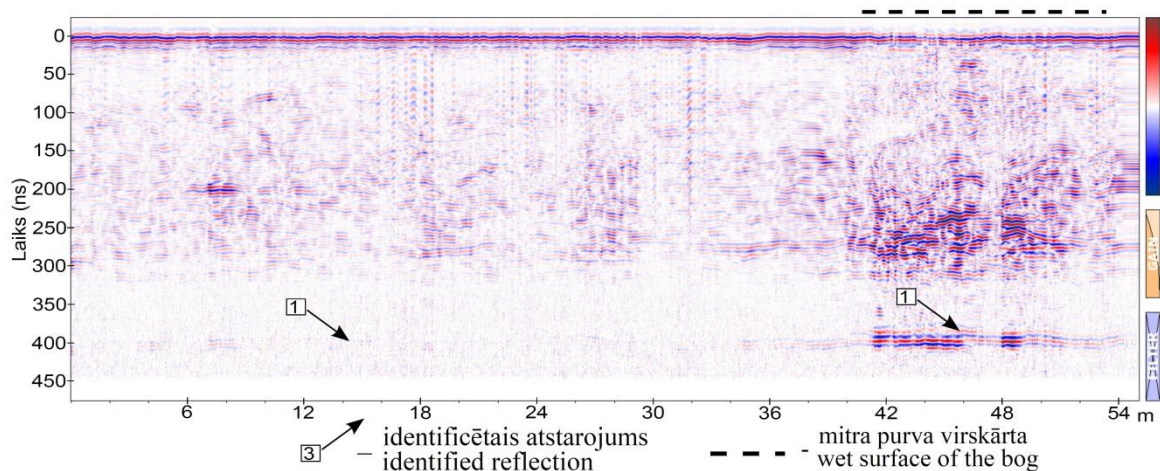
izmantojot aerofoto uzņēmumus, tika noteikti un izvēlēti tie purvi, kuros ir sastopams pēc iespējas mazāk koku.

Netika izvēlēti purvi, kurus klāj salīdzinoši biezs apaugums, jo monogrāfijās, kas veltītas radiolokācijas problemātikai, ir minēts, ka koki bieži vien izraisa radiolokācijas signāla atstarojumus, kas traucē veikt kvalitatīvu iegūto informatīvo atstarojumu analīzi (Jol, 2009). Līdzīgus novērojumus ir aprakstījis arī disertācijas autors savos iepriekš veiktajos pētījumos (Vlads, Karušs, 2014; Karušs, 2010b).

Pēc purvu, kuros varētu tikt veikti detalizēti radiolokācijas pētījumi, izvēles tika veikta to apsekošana. Apsekošanas laikā izvēlētajos purvos tika veikta radiolokācijas profilēšana, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu. Radiolokācijas profilēšana tika veikta, aptverot gan purva malu, gan centrālo daļu.

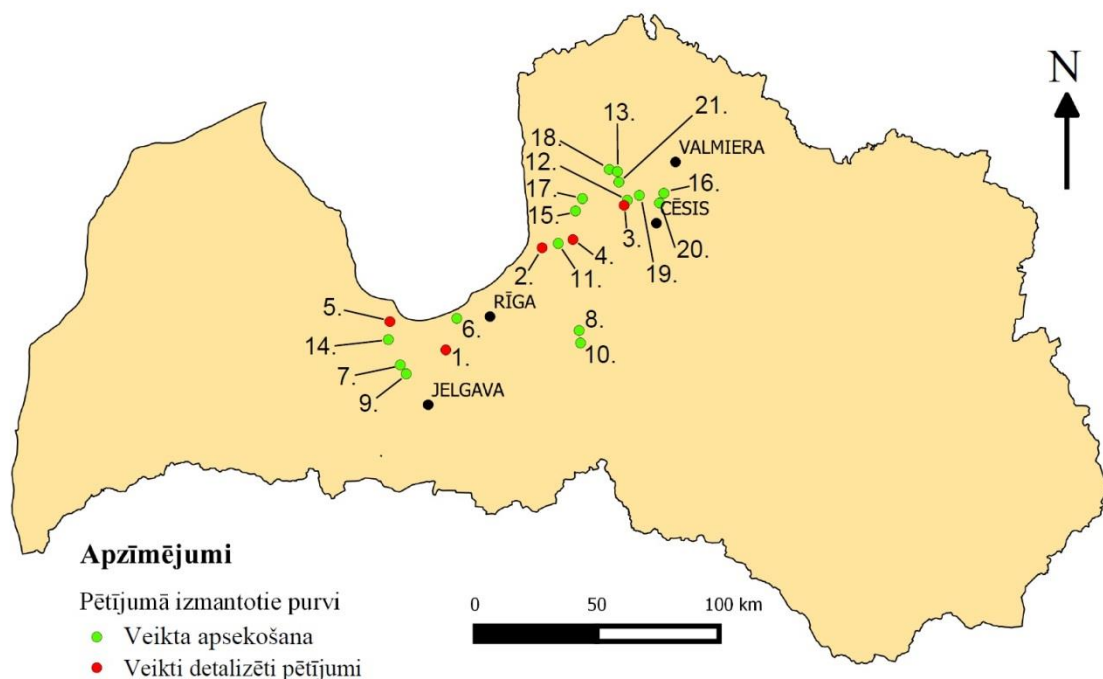
Apsekošanas mērķis bija noteikt ne tikai purvus, bet arī konkrētas vietas purvos, kurās būtu iespējams veikt detalizētus pētījumus. Tika meklētas vietas, kuras atbilstu vairākiem kritērijiem:

- Iegūtajās radarogrammās ir iespējams viennozīmīgi identificēt ne tikai atstarojumu, kas saistāms ar purva gultni, bet arī vismaz vienu atstarojumu, kas būtu saistāms ar purvu nogulumu slāņu robežām. Atzīmējams, ka, izmantojot tikai radiolokācijas profilēšanas gaitā iegūto radarogrammu, nav iespējams viennozīmīgi identificēt, vai kāds no identificētajiem atstarojumiem ir saistāms ar purva gultni. Līdz ar to, analizējot iegūtās radarogrammas, tika pieņemts, ka radiolokācijas signāla atstarojums, kas ir saņemts pēc vislielākā laika, ir saistāms ar purva gultni.
- Pētījumu teritorijā purva nogulumu biezumam jābūt intervālā no 3 m līdz 6,5 m. Purva virsējie slāņi līdz aptuveni viena metra dziļumam ir salīdzinoši heterogēni, un to mitrums nereti mainās sezonāli (Šņore, 2004). Tāpat purva virsējiem slāņiem ir salīdzinoši sarežģīti noteikt precīzu kūdras mitruma daudzumu (2.4.3. nodaļa). Rezultātā gadījumos, ja būtu nepieciešams veikt atkārtotus mērījumus, iegūtie dati nebūtu korekti salīdzināmi ar iepriekš iegūtajiem datiem. Minētais noteica to, ka tika izvēlētas vietas, kur kūdras biezums ir vismaz trīs metri. Savukārt, ņemot vērā to, ka lielo dielektrisko zudumu dēļ iegūt izteiktus un viennozīmīgi identificējamus ģeoradara signāla atstarojumus no salīdzinoši liela dziļuma ir sarežģīti (1.3.2. nodaļa), un to, ka no dziļuma, kas pārsniedz septiņus metrus, iegūto signālu verifikācija ir sarežģīta, tika izvēlētas vietas, kur kūdras biezums nepārsniedz 6,5 m. Apsekošanas laikā, nosakot iespējamo purva biezumu, tika pieņemts, ka  $\epsilon$  ir vienāda ar 72. Minētā vērtība tika izvēlēta, ņemot vērā līdzšinēji veikto pētījumu rezultātus (1.1.2. nodaļa).
- Purva virsma ir pietiekoši stabila, lai izvēlētajā vietā varētu tikt veikti atkārtoti radiolokācijas mērījumi, kā arī ierīkoti papildus urbumi.
- Purva virsmai ir jābūt iespējami līdzenai un mitrai. Pētījumus tika izvēlēts veikt salīdzinoši mitrākās vietās, jo apsekošanas laikā tika konstatēts, ka, ierakstot radiolokācijas profilu virs mitras purva virsmas, iegūtajā radarogrammā identificētajiem atstarojumiem ir ievērojami lielāka amplitūda. Tā, piemēram, veicot radiolokācijas profilēšanu Drabiņu purvā, tika konstatēts, ka, šķērsojot vietas, kurās purva virskārta ir mitrāka, ierakstītie atstarojumi ir daudz izteiktāki nekā pārējās radarogrammas daļās (2.1. attēls).



2.1. attēls. Drabiņu purvā ierakstītā radarogramma  
 Figure 2.1. A radar image recorded in the bog Drabiņu

Izmantojot iepriekš aprakstītos kritērijus, disertācijas izstrādes gaitā tika apsekots 21 purvs. No kuriem piecos purvos tika noteiktas piemērotas vietas detalizētu pētījumu veikšanai (2.2. attēls) (2.1. tabula).



2.2. attēls. Apsekoto purvu novietojums  
 Numuriem atbilstošos purvus skatīt 2.1. tabulā.

Figure 2.2. Location of surveyed bogs  
 Numbers matching names are listed in the table 2.1.

Atzīmējams, ka, veicot purva apsekošanu, netika aptverta pilnībā visa purva teritorija. Katrā no izvēlētajiem purviem apsekošanas laikā radiolokācijas profilēšana tika veikta tikai daļā no purva teritorijas. Tādēļ šajā pētījumā iegūtie dati neļauj sniegt objektīvu novērtējumu par teritoriju, kas atbilstu noteiktajiem kritērijiem, izplatību apsekotajos purvos. Jāpiebilst, ka rezultāti, kas tika iegūti Cenas tīrelī un Makinu purvā apsekošanas gaitā, liecina par to, ka vietām, kas atbilst izvirzītajiem kritērijiem, ir lokāls

raksturs. Minētais iespējams noteica to, ka pārējos purvos, kuros tika veikta apsekošana, šādas vietas netika konstatētas.

2.1. tabula. Pētītie purvi  
Table 2.1. Surveyed bogs

Nr.	Nosaukums	Novads	Novietojums (LKS92 koordinātu sistēmā)		Izpētes veids
			x	y	
1.	Cenas tīrelis	Babītes	301517	490911	Detalizēta
2.	Dzelves purvs	Sējas	343377	530354	Detalizēta
3.	Makinu purvs	Pārgaujas	360731	563978	Detalizēta
4.	Laugas purvs	Krimuldas	346727	542972	Detalizēta
5.	Raganu purvs	Engures	313166	467979	Detalizēta
6.	Slēperes purvs	Babītes	314447	495394	Apsekošana
7.	Drabiņu purvs	Jelgavas	295397	472220	Apsekošana
8.	Kangaru purvs	Ropažu	309489	545532	Apsekošana
9.	Kaigu purvs	Jelgavas	291757	474659	Apsekošana
10.	Žļaugu purvs	Ogres	304385	546095	Apsekošana
11.	Eipuru purvs	Sējas	345156	536959	Apsekošana
12.	Daibes purvs	Pārgaujas	362818	565269	Apsekošana
13.	Vecmuižas purvs	Limbažu	374544	561218	Apsekošana
14.	Ķemeru purvs	Tukuma	305777	467350	Apsekošana
15.	Aijažu purvs	Krimuldas	358449	544056	Apsekošana
16.	Ķūķu purvs	Valmieras	365712	580264	Apsekošana
17.	Lielais purvs	Limbažu	363484	546885	Apsekošana
18.	Zaltenes purvs	Limbažu	375440	557929	Apsekošana
19.	Teterīša purvs	Pārgaujas	364838	570203	Apsekošana
20.	Blaņķu purvs	Pārgaujas	361703	578473	Apsekošana
21.	Annasmuižas purvs	Pārgaujas	370238	561817	Apsekošana

### 2.3. Radiolokācijas pētījumi

Līdzšinējos līdzīga rakstura pētījumos nereti salīdzinoši maza vērība ir tikusi piešķirta radiolokācijas datu iegūšanas metodikai, kā arī precizitātei, ar kādu ir noteikts dziļums, kurā iegūļ robeža, no kuras ir notikusi ģeoradara signāla atstarošanās (Oliveira et al., 2012; Van Bellenet al., 2011). Minētais ierobežo un var radīt būtiskas kļūdas iegūto datu interpretācijas precizitātē. Ņemot vērā iepriekš minēto, šī pētījuma izstrādes gaitā īpaša uzmanība tika pievērsta radiolokācijas mērījumu veikšanas metodikas izvēlei un pilnveidošanai.

#### 2.3.1. Sniega segas ietekme uz iegūtajiem rezultātiem

Apkopojot līdz šim veiktos radiolokācijas pētījumus purvu nogulumos, tika konstatēts, ka maza vērība ir tikusi piešķirta sniega segas ietekmei uz radiolokācijas mērījumu precizitāti un iegūto radarogrammu kvalitāti. Tā, piemēram, atsevišķos pētījumos radiolokācijas mērījumi ir veikti gan ziemā, laika periodā, kad purvu klāj sniega

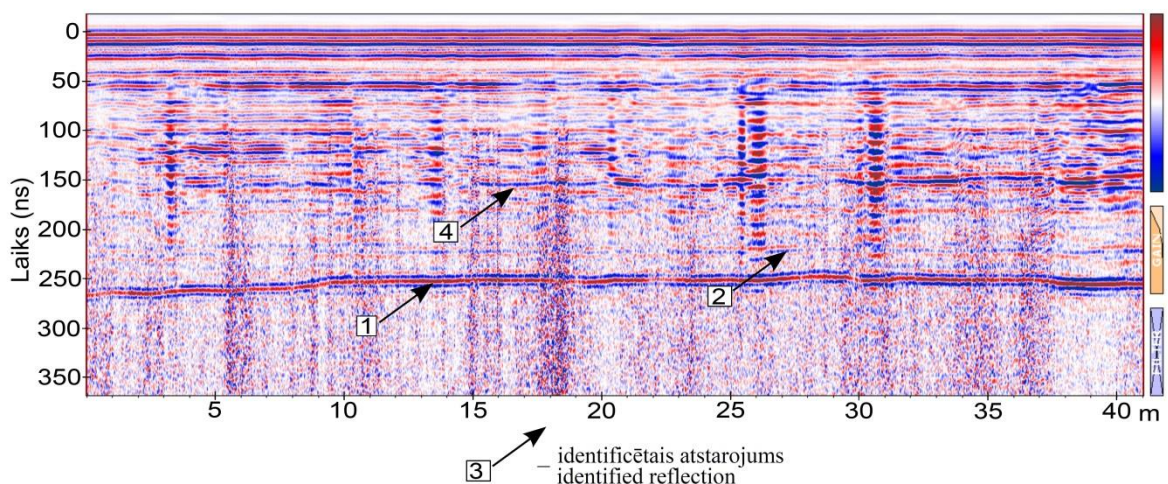
sega, gan vasarā (Plado et al., 2011). Šajos gadījumos pētījuma autori ir minējuši, ka ziemā iegūtajās radarogrammās ir vērojami vairāki subhorizontāli atstarojumi, kas apgrūtina ieraksta interpretāciju līdz 50 ns laika atzīmei, taču kopumā iegūtie rezultāti ir līdzīgi. Tomēr iegūtajās radarogrammās ir skaidri redzams, ka intensitāte ir būtiski samazinājusies arī tiem atstarojumiem, kas ir saņemti pēc lielāka laika intervāla (Plado et al., 2011). Rezultātā iepriekš veikto pētījumu analīze neļauj pilnībā izvērtēt sniega segas ietekmi uz iegūtajiem radiolokācijas mērījumiem.

Lai noskaidrotu potenciālo sniega segas ietekmi uz iegūtajiem radiolokācijas mērījumiem pētījumu objektā Cenas tīrelī, radiolokācijas profilēšana, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu, tika atkārtoti veikta laika periodā, kad pētījumu teritoriju klāja vidēji 30 cm bieza sniega sega. Radiolokācijas profilēšanas gaitā uzmanība tika pievērsta tam, lai antenu sistēma pārvietotos pa pēc iespējas gludāku sniega virsmu (2.3. attēls). Tas tika darīts, lai nodrošinātu pēc iespējas netraucētāku un ciešāku antenu sistēmas kontaktu ar zemes virsmu.



2.3. attēls. Radiolokācijas profilēšana Cenas tīrelī (J. Vībāna foto, 2012. gada decembris)  
Figure 2.3. Radiolocation profiling in the Cenas tīrelis (Photo by J. Vībāns, December of 2012)

Analizējot iegūtos rezultātus, tika konstatēts, ka ziemā iegūtā radarogramma būtiski atšķiras no vasarā iegūtās radarogrammas (2.4. attēls, 4.1. attēls).



2.4. attēls. Cenas tīrelī ziemā ar 300 MHz antenu sistēmu ierakstītā radarogramma  
Figure 2.4. A radar image of the Cenas tīrelis recorded with a 300 MHz antenna system during the winter season

Pirmkārt, ziemā iegūtajā radarogrammā, līdzīgi kā iepriekšējos pētījumos (Plado et al., 2011), tika konstatēti subhorizontāli atstarojumi, kas saistāmi ar sniega segu un sasalušo kūdras virskārtu. Otrkārt, ar purva gultni saistītais atstarojums ziemā iegūtajā radarogrammā ir ar būtiski mazāku amplitūdu nekā vasarā iegūtajā radarogrammā. Treškārt, subhorizontālie atstarojumi, kas saņemti no robežām starp kūdras slāņiem ar atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām, ir daudz neizteiktāki ziemā iegūtajā radarogrammā. Pie tam daļa no subhorizontālajiem atstarojumiem, kurus ir iespējams identificēt un izsekot visā profila garumā vasarā iegūtajā radarogrammā, ziemā iegūtajā radarogrammā nav identificējami vispār (2.4. attēls, 4.1. attēls). Iepriekš minētais norāda uz to, ka sniega sega būtiski ietekmē ģeoradara signāla amplitūdas zudumus. Lielie amplitūdas zudumi varētu būt saistīti ar krasajām elektromagnētisko īpašību atšķirībām starp sniegu, sasalušo zemes virskārtu un nesasalušo kūdru.

Ņemot vērā iegūtos rezultātus, jāsecina, ka sniega sega būtiski ietekmē radiolokācijas mērījumus un ziemā iegūtie mērījumi nav salīdzināmi ar vasarā iegūtajiem mērījumiem. Līdz ar to disertācijas izstrādes gaitā radiolokācijas mērījumi tika veikti tikai laika periodā, kad purva virsmu neklāja sniega sega un tā nebija sasalusi.

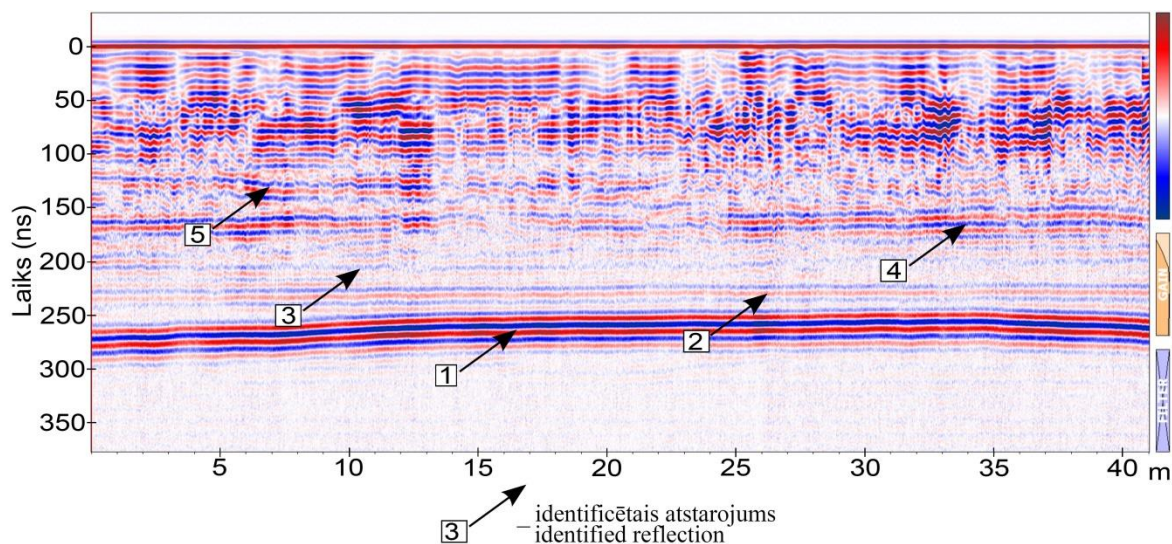
### **2.3.2. Pētījuma gaitā izmantotais ģeoradars un antenu sistēmas**

Apkopojot un analizējot zinātniskās publikācijas par līdz šim veiktajiem radiolokācijas pētījumiem purvos, tika konstatēts, ka šajos pētījumos tiek pielietoti dažādu kompāniju ražotie ģeoradari (1.3. nodaļa). Ņemot vērā to, ka RADAR Systems ražoto Zond sērijas ģeoradaru tehniskā specifikācija un iestatījumu iespējas ļauj sasniegt šī pētījuma sākumā izvirzīto mērķi un izpildīt visus uzstādītos uzdevumus, pētījums tika realizēts, izmantojot ģeoradaru Zond 12e (1.2.2. nodaļa).

Līdzšinēji veiktajos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi ir tikušas izmantotas antenu sistēmas ar salīdzinoši atšķirīgām centrālajām frekvencēm. Vairumā gadījumu ir pielietotas antenu sistēmas ar centrālo frekvenci, kas ir tuva 250 MHz, taču atsevišķos pētījumos ir pielietotas antenu sistēmas ar centrālo frekvenci, kas variē intervālā no 25 MHz līdz 900 MHz (Mustgrave, Binley, 2011; Lowry et al., 2009; Kettridge et al., 2008; Comas et al., 2005a). Ir sastopami pētījumi, kuros ir izmantotas vairākas antenu sistēmas ar atšķirīgām centrālajām frekvencēm, taču minētajos pētījumos vienā pētījumu objektā nav pielietotas vairāk kā 3 dažādas antenu sistēmas, kas ļauj izdarīt ierobežotus atzinumus par optimālas antenu sistēmas frekvences izvēli. Rezultātā, apkopojot līdz šim veiktos radiolokācijas pētījumus purvos, nav iespējams viennozīmīgi noteikt, kādu antenu sistēmu būtu ieteicams izmantot līdzīgos pētījumos.

Disertācijas izstrādes sākumposmā Cenas tīrelī tika veikti eksperimenti, izmantojot vairākas antenu sistēmas, ar mērķi noteikt piemērotāko antenu sistēmu pētījuma mērķa sasniegšanai (Karušs, Segliņš, 2014). Radiolokācijas profilēšana tika veikta, izmantojot 75 MHz, 150 MHz, 300 MHz, 500 MHz un 900 MHz antenu sistēmas.

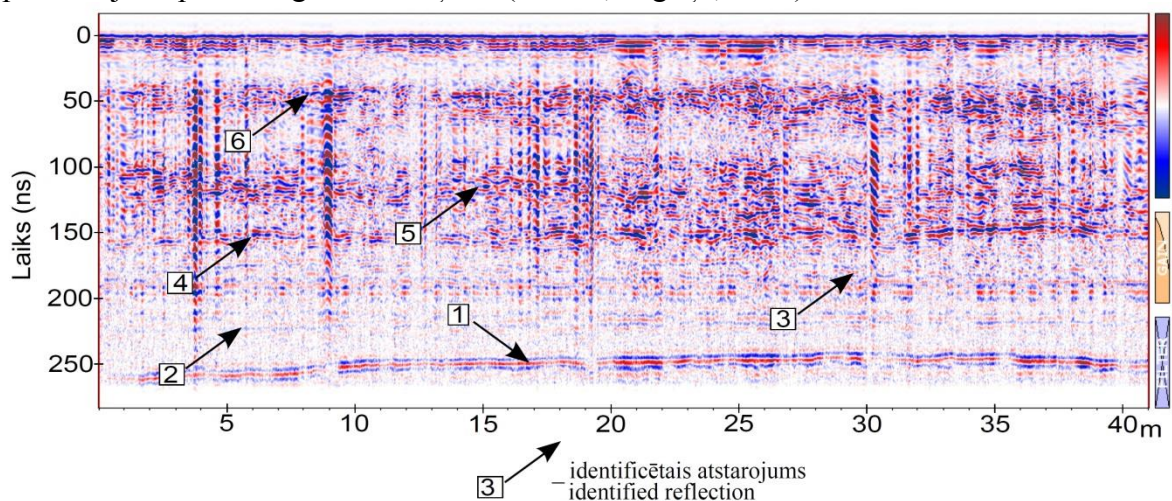
Veicot iegūto rezultātu analīzi, tika konstatēts, ka, izmantojot 75 MHz antenu sistēmu, ir iespējams iegūt ļoti spēcīgu atstarojumu, kas saistāms ar purva gultni. Taču radarogrammā, kas ierakstīta, veicot radiolokācijas profilēšanu pa to pašu radiolokācijas profilu, ar antenu sistēmu, kuras frekvence ir tuva 250 MHz, ir iespējams identificēt subhorizontālus atstarojumus, kas nav identificējami radarogrammā, kas ierakstīta ar 75 MHz antenu sistēmu (2.5. attēls, 2.6. attēls, 4.1. attēls).



2.5. attēls. Cenais tūnelī ar 75 MHz antenu sistēmu ierakstītā radarogramma  
 Figure 2.5. A radar image of the Cenais tunnel recorded with a 75 MHz antenna system

Tāpat, veicot radarogrammu salīdzināšanu, tika konstatēts, ka ar 300 MHz antenu sistēmu un 500 MHz antenu sistēmu iegūtajās radarogrammās identificētie atstarojumi ir daudz izteiktāki un vieglāk izsekojami nekā radarogrammā, kas iegūta ar 75 MHz antenu sistēmu (2.5. attēls, 2.6. attēls, 4.1. attēls).

Savstarpēji salīdzinot rezultātus, kas tika iegūti ar 300 MHz un 500 MHz antenu sistēmām, tika konstatēts, ka ar 500 MHz antenu sistēmu nav iespējams iegūt radarogrammas ar izšķirtspēju, kas būtiski pārsniegtu to radarogrammu izšķirtspēju, kas ir iegūtas ar 300 MHz antenu sistēmu (2.6. attēls, 4.1. attēls). Pie tam tika konstatēts, ka ar 500 MHz antenu sistēmu iegūtās radarogrammas sniedz detalizētu informāciju par purva nogulumiem tikai līdz aptuveni 4 m dziļumam, jo dielektrisko zudumu dēļ no lielāka dziļuma iegūtie atstarojumi ir salīdzinoši vāji un grūti identificējami. Tāpat lielo dielektrisko zudumu dēļ ar 900 MHz antenu sistēmu tika iegūta detalizēta informācija tikai par virsējiem purva nogulumu slāņiem (Karušs, Segliņš, 2014).

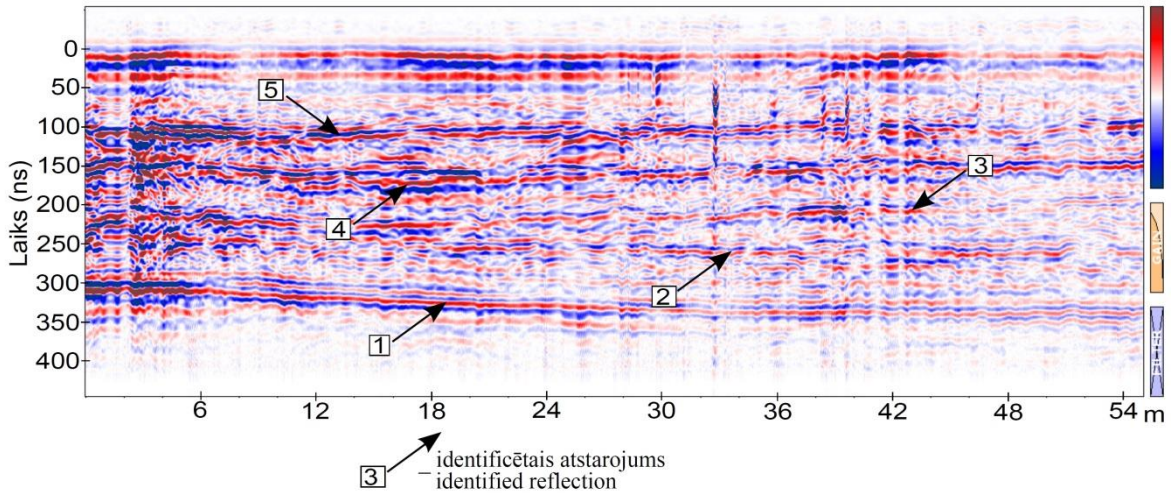


2.6. attēls. Cenais tūnelī ar 500 MHz antenu sistēmu ierakstītā radarogramma  
 Figure 2.6. A radar image of the Cenais tunnel recorded with a 500 MHz antenna system

Tā kā disertācijas gaitā bija plānots veikt pēc iespējas detalizētākus radiolokācijas mērījumus visā purva griezumā purvos, kuru dziļums variē intervālā no 3 m līdz 6,5 m, radiolokācijas mērījumus tika izvēlēts veikt, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.



Atzīmējams, ka Makinu purva radarogrammā, kas tika ierakstīta, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu, bija salīdzinoši grūti identificēt atstarojumus no purva dziļākajiem slāņiem, kā arī purva gultnes. Sekojoši Makinu purvā ierīkotais radiolokācijas profils tika ierakstīts arī ar 100 MHz antenu sistēmu. Kā redzams gan ar 300 MHz, gan ar 100 MHz antenu sistēmu iegūtajās radarogrammās ir iespējams identificēt vienus un tos pašus subhorizontālos atstarojumus (2.7. attēls, 4.14. attēls), pie tam ar 100 MHz antenu sistēmu ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi ir ar lielāku amplitūdu.



2.7. attēls. Makinu purvā ar 100 MHz antenu sistēmu ierakstītā radarogramma  
 Figure 2.7. A radar image of the bog Makinu recorded with a 100 MHz antenna system

Tomēr, ņemot vērā to, ka 100 MHz antenu sistēmas efektīvu pārvietošanu pa purva virsmu traucē tās konstrukcija (2.8. attēls), minētā antenu sistēma nav piemērota radiolokācijas profilēšanai purvainās teritorijās. Rezultātā minētā antenu sistēma šī pētījuma gaitā tika izmantota tikai gadījumos, kad ar 300 MHz antenu sistēmu neizdevās iegūt radarogrammu, kurā būtu iespējams skaidri identificēt atstarojumu, kas ir saistīts ar purva gultni.



2.8. attēls. SIA RADAR systems ražotā 100 MHz antenu sistēma (2013. gada oktobris)  
 Figure 3.8. The 100 MHz antenna system manufactured by SIA RADAR systems (October of 2013)

### 2.3.3. Radiolokācijas mērījumu veikšana

Ņemot vērā veiktā pētījuma specifiku, radiolokācijas mērījumus tika izvēlēts veikt, pamatā izmantojot radiolokācijas profilēšanas metodi (1.2.4. nodaļa). Disertācijas izstrādes sākumposmā, izmantojot galvenokārt Cenas tīrelī iegūtos pētījumu rezultātus, tika analizēti vairāki radiolokācijas mērījumu veikšanas aspekti. Uzmanība tika pievērsta

jautājumiem, kas saistīti gan ar optimālajiem ģeoradara iestatījumiem mērījumu veikšanas gaitā, gan ar mērījumu veikšanas procesu (Karušs, Segliņš, 2014). Turpmāk disertācijā tiks apskatīti tie ar radiolokācijas mērījumu veikšanu saistītie jautājumi, kuri salīdzinoši būtiski ietekmē purvainās teritorijās iegūto atstarojumu sasaisti ar nogulumu fizikālo īpašību maiņu ģeoloģiskajā griezumā.

Izvēlētais laika logs – dziļums, līdz kuram tika veikts ieraksts:

Laika aizture, līdz kurai tika veikts ieraksts, tika izvēlēta, izmantojot testa signālu. Ņemot vērā veiktā pētījuma specifiku, lauka apstākļos uzmanība tika pievērsta tam, lai iegūtajās radarogrammās būtu fiksēts signāls, kas saistāms ar purva gultni. Minētais noteica to, ka visos pētījuma objektos tika izmantots 500 ns laika logs. Pieņemot, ka  $\epsilon$  ir vienāda ar 72, tas atbilst 8,83 m.

Atkārtots ieraksts:

Veicot radiolokācijas profilēšanu objektos, kuru virsma ir nelīdzena un pārvietošanās apgrūtināta, bieži vien ieraksts nav veikts, vienmērīgi pārvietojoties. Rezultātā iegūtās radarogrammas garuma ass nav lineāra, vai pat daļa ieraksta ir veikta, antenai atrodoties vienā punktā. Tāpat nereti radiolokācijas profilēšanas gaitā antenu sistēma zaudē ciešu kontaktu ar zemes virsmu, kas būtiski ietekmē iegūtās radarogrammas kvalitāti. Iepriekš minētais noteica to, ka visi izvēlētie radiolokācijas profili tika ierakstīti divas reizes. Vēlāk detalizētai datu apstrādei un interpretācijai tika izvēlētas kvalitatīvākās radarogrammas.

Veiktās distances fiksēšana:

Radiolokācijas profilēšanas laikā distances fiksēšanai netika izmantots ar iekārtu savienojams odometrs. Odometrs netika izmantots, jo zemes virsma purvā parasti ir ļoti nelīdzena, un līdz ar to odometra fiksētā distance neatbilstu reālajam radiolokācijas profila garumam.

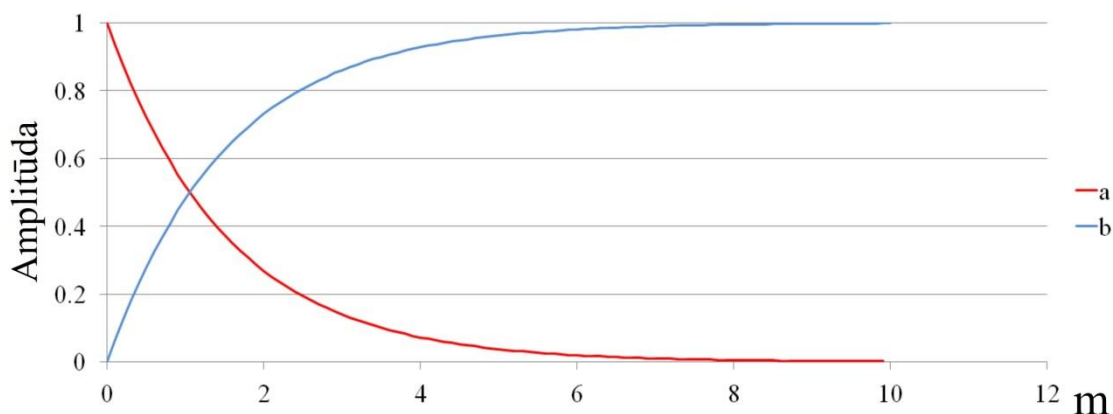
Veicot radiolokācijas ierakstu bez ar iekārtu savietojama odometra, ģeoradars veic fiksētu zondējumu skaitu sekundē neatkarīgi no veiktās distances (ģeoradars Zond 12e veic 81 zondējumu sekundē). Minētais nosaka to, ka ieraksta laikā antenu sistēma ir jāpārvieto vienmērīgā ātrumā. Tas jā dara tāpēc, lai noietās distances garums pieaugtu lineāri, un rezultāta ierakstītās radarogrammas distances ass būtu lineāra. Saglabāt vienmērīgu pārvietošanās ātrumu purvā ir salīdzinoši sarežģīti, tomēr neprecizitātes, kas saistītas ar nevienmērīgu antenas virzību radiolokācijas profilēšanas gaitā, ir daudz mazākas nekā neprecizitātes, kas rastos, izmantojot odometru.

Iepriekš minētais noteica to, ka izvēlēto radiolokācijas profilu garums tika fiksēts ar mērlenti, kā arī profilu galapunkti tika fiksēti, izmantojot GPS iekārtu.

#### **2.3.4. Ierakstīto radarogrammu apstrāde**

Autora pētījuma gaitā iegūtās radarogrammas tika apstrādātas datorprogrammā Prism 2.5. Radarogrammu apstrādes laikā tika izmantotas pēc iespējas mazāk apstrādes funkcijas un digitālie filtri, lai informatīvo signālu zudumi būtu minimāli. Šāda pieeja tiek rekomendēta arī vairākās monogrāfijās un publikācijās, kur apskatīta radiolokācijas datu apstrādes metodika (1.3.1. nodaļa; Karušs, Segliņš, 2012).

Radarogrammu apstrāde tika uzsākta, izmantojot funkciju „Gain” (Zolotarev, 2007), kuru izmantojot, iegūtie atstarojumi tika pastiprināti proporcionāli laikam, pēc kura tie saņemti. Pastiprinot iegūtos atstarojumus, tika ņemts vērā, ka, signāliem izplatoties disipatīvā vidē, par kādu ir uzskatāma kūdra, signālu amplitūda samazinās eksponenciāli (2.9. attēls) (1.1.1. nodaļa).



2.9. attēls. Iegūto atstarojumu pastiprināšana

Apzīmējumi: a – 300 MHz signāla amplitūdas samazināšanās, tam izplatoties ūdenī; b – izmantotā pastiprinājuma funkcija.

Figure 2.9. Amplification of obtained reflections

Legend: a – amplitude losses of 300 MHz signal during its propagation in water; b – function of used amplification.

Atzīmējams, ka precīzas pastiprinājuma vērtības ierakstītajam laika logam tika izvēlētas, vizuāli novērtējot iegūto radarogrammu. Proti, pastiprinot identificētos atstarojumus, tika vizuāli novērtēts, vai visiem identificētajiem atstarojumiem ir līdzīgas amplitūdas.

Autora pētījuma gaitā radarogrammas tika ierakstītas nepārtraukti, nepielietojot ar iekārtu savienojamu odometru. Izmantojot šāda veida ģeoradara komplektāciju, nereti, uzsākot ierakstu, ģeoradara operators vēl nav sācis kustību, kā rezultātā ieraksta sākumā ir sastopami zondējumi, kas ir ierakstīti vienā un tajā pašā punktā. Ņemot vērā to, ka šādi zondējumi traucē efektīvu digitālo signālu filtru izmantošanu, pirms tālākas iegūto radarogrammu apstrādes šie zondējumi tika dzēsti (Zolotarev, 2007). Pēc minēto zondējumu dzēšanas tika iestatīts radarogrammai atbilstošā radiolokācijas profila garums.

Iegūtajās radarogrammas bieži sastopami neinformatīvi zemfrekvences signāli, kas saistīti ar purva nelīdzeno virsmu (Karušs, Segliņš, 2013a). Tāpat radarogrammās, kas iegūtas, veicot radiolokācijas profilēšanu purvos, parasti ir sastopami neinformatīvi signāli ar salīdzinoši zemu frekvenci (Karušs, Segliņš, 2013a). Minētie signāli tika dzēsti, izmantojot „Ormsby bandpass” filtru (Zolotarev, 2007).

Apstrādājot radarogrammas, kas tika ierakstītas, izmantojot 75 MHz un 500 MHz antenu sistēmas, tika pielietots arī „background removal” filtrs (Zolotarev, 2007).

### 2.3.5. Laika ass korekcija

Salīdzinoši bieži ģeoradara iekārtās, kas ir izstrādātas mērījumu veikšanai ar bistatiskajām antenām, laika atskaite tiek sākta momentā, kad no raidītāja antenas izstarotais ģeoradara signāls ir sasniedzis uztvērējantenu (tiešā signāla saņemšanas brīdis) (Zolotarev, 2007; Neal, 2004). Ņemot vērā to, ka raidītājantena un uztvērējantena nav novietotas cieši kopā, nepieciešams laiks, lai tiešais signāls nonāktu uztvērējantēnā. Rezultātā laika atskaite tiek sākta brīdī, kas neatbilst momentam, kad ģeoradara signāls tiek izstarots. Līdz ar to, nosakot laiku, pēc kura tiek saņemti atstarojumi, jāņem vērā laika intervāls, kas bija nepieciešams, lai tiešais signāls veiktu attālumu starp raidītāj un uztvērēj antenām. Iepriekš minētais nosaka to, ka, aprēķinot laiku, kas bija nepieciešams ģeoradara signālam, lai tas veiktu distanci starp ģeoradara antenu sistēmu un atstarojošo virsmu, jāizmanto formula (2.1).

$$t = t_s + t_k, \text{ kur} \quad (2.1)$$

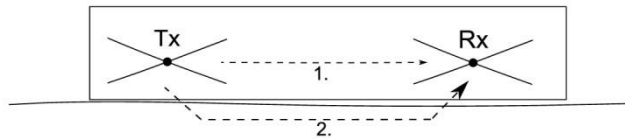
$t$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls veiktu distanci starp ģeoradara antenu sistēmu un atstarojošo virsmu (s);  
 $t_s$  – laiks, pēc kura ir saņemts ģeoradara signāla atstarojums (s);  
 $t_k$  – laiks, kas nepieciešams, lai tiešais signāls sasniegtu uztvērējantenu (s).

Šī problēma tiek risināta, veicot laika korekciju „move-out correction” (Neal, 2004). Gadījumā, ja izmantotā antenu sistēma zondēšanas laikā nav tiešā kontaktā ar zemi, bet gan ir pacelta gaisā, iepriekš minētās laika korekcijas aprēķināšana ir salīdzinoši vienkāršs uzdevums. Zinot attālumu starp raidītāj un uztvērēj antenu un pieņemot, ka gaisam raksturīgā  $\epsilon$  ir viens, laika korekciju var aprēķināt, izmantojot formulu (2.2).

$$t_k = \frac{S}{c}, \text{ kur} \quad (2.2)$$

$t_k$  – laiks, kas nepieciešams, lai tiešais signāls sasniegtu uztvērējantenu (s);  
 $S$  – attālums starp raidītāj un uztvērēj antenu (m);  
 $c$  – gaismas ātrums vakuumā (m/s).

Situācija ir ievērojami sarežģītāka, ja izmantotā antenu sistēma radiolokācijas zondēšanas laikā ir kontaktā ar zemes virskārtu. Šādā gadījumā tiešais signāls ir gan signāla, kas ceļojis starp antenām pa gaisu, gan signāla, kas ir ceļojis starp antenām pa zemes virskārtu, summa (2.10. attēls) (Jol, 2009).



2.10. attēls. Tiešā signāla atsevišķās komponentes

Apzīmējumi: Tx – raidītājantena; Rx – uztvērējantena; 1. – signāls, kas ceļojis starp antenām pa gaisu; 2. – signāls, kas ceļojis starp antenām pa zemes virskārtu.

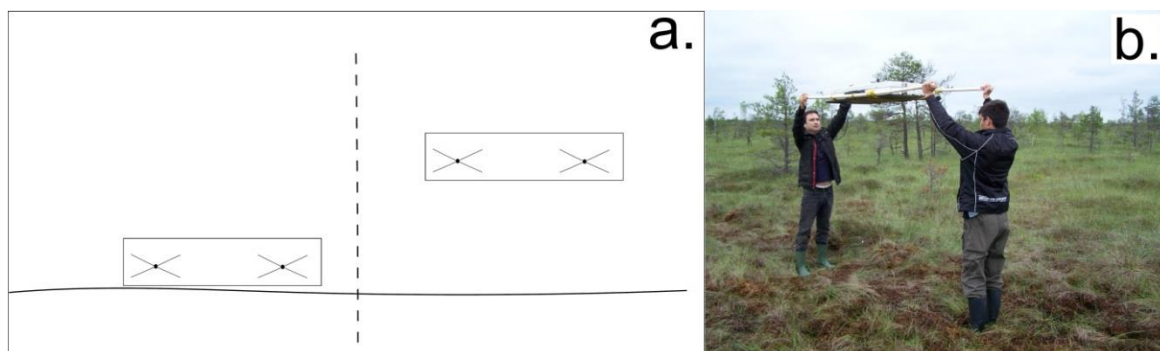
Figure 2.10. Separate components of a direct signal

Legend: Tx – transmitter antenna; Rx – receiver antenna; 1 – signal travelling between antennas through the air; 2 - signal travelling between antennas along the surface of ground.

Monogrāfijās, kurās apskatīta radiolokācijas metode, iepriekš minētā summārā signāla ātrums ir aptuveni par 10% lielāks nekā signāla izplatīšanās ātrums pa zemes virskārtu (Finkel'shteyn, et al., 1994). Rezultātā laiku, kas bija nepieciešams, lai tiešais signāls sasniegtu uztvērējantenu, nevar aprēķināt, izmantojot formulu 2.2.. Un ņemot vērā to, ka zemes virskārtas īpašības dažādos purvos ir krasi atšķirīgas, laika korekcijas lielumu nav iespējams aprēķināt, izmantojot zinātniskajā literatūrā publicētās kūdrai raksturīgās  $\epsilon$  vērtības.

Veiktā pētījuma izstrādes gaitā tika pielietota salīdzinoši vienkārša eksperimentāla metode, ar kuras palīdzību var precīzi aprēķināt laiku, kas bija nepieciešams, lai tiešais signāls veiktu distanci no raidītājantenas uz uztvērējantenu.

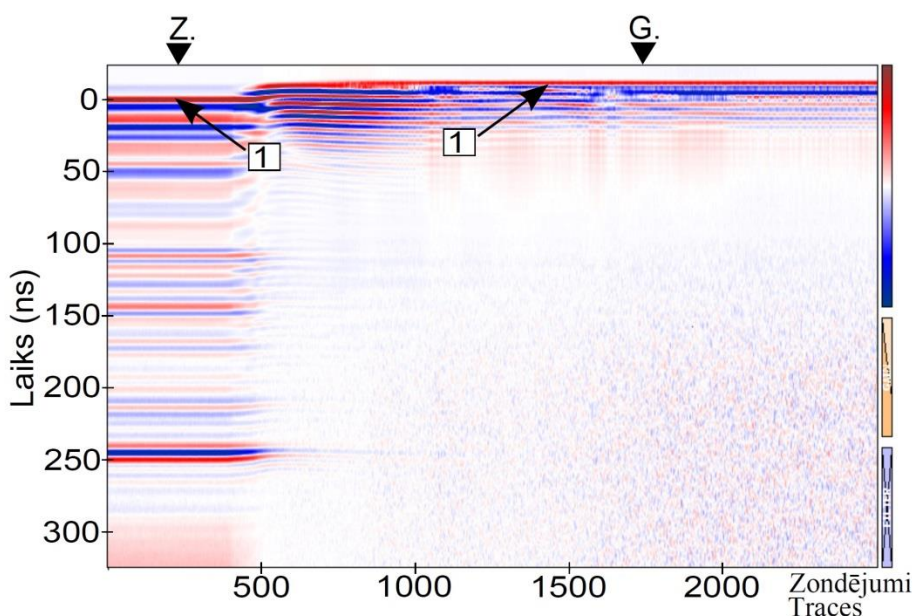
Eksperimenta sākumā antenu sistēma ir jānovieto uz zemes virskārtas. Tālāk ir jāuzsāk radarogrammas ieraksts, un pēc dažu zondējumu ieraksta antenu sistēma jāpacel gaisā. Antenai atrodoties gaisā, tāpat ir jāveic dažu zondējumu ieraksts (2.11. attēls). Ieraksta laikā ir būtiski atzīmēt momentu, kad antenu sistēma atrodas uz zemes virskārtas, un momentu, kad tā ir pilnībā pacelta gaisā.



2.11. attēls. Shematiskais antenu sistēmas attēlojums eksperimenta sākumā un beigās (a) un antenu sistēmas pozīcija eksperimenta beigās (2013.gada jūnijs) (b)

Figure 2.11. A schematic depiction of antenna system at the beginning and the end of the experiment (a); position of antenna system at the end of the experiment (June of 2013) (b)

Kā redzams šāda eksperimenta gaitā iegūtajā radarogrammā, antenu sistēmai atrodoties gaisā, tiešais signāls ir saņemts vairākas nanosekundes ātrāk nekā antenu sistēmai atrodoties uz zemes virskārtas (2.12. attēls). Izmantojot iegūto radarogrammu, ir iespējams nomērīt, pēc kāda laika ir saņemts tiešais signāls, antenu sistēmai atrodoties uz zemes virskārtas, relatīvi tiešajam signālam, kas tika ierakstīts, antenu sistēmai atrodoties gaisā.



2.12. attēls. Laika korekcijas noteikšanas eksperimenta gaitā iegūtā radarogramma  
Apzīmējumi: 1 – identificētais tiešais signāls; Z – antenu sistēma novietota uz zemes virskārtas; G – antenu sistēma pacelta gaisā.

Figure 2.12. A radar image obtained during the move-out correction determination experiment

Legend: 1 – identified direct signal; Z – antenna system is located on the ground; G – antenna system is lifted in the air.

Ņemot vērā to, ka, antenu sistēmai atrodoties gaisā, laiku, kas bija nepieciešams, lai tiešais signāls veiktu distanci no raidītājantenas uz uztvērējantenu, ir iespējams aprēķināt, pieņemot, ka gaisam raksturīgā  $\epsilon$  ir viens, laika korekciju var aprēķināt, izmantojot formulu 2.3.

$$t_k = \frac{S}{c} + t_d, \text{ kur} \quad (2.3)$$

$t_k$  – laiks, kas nepieciešams, lai tiešais signāls sasniegtu uztvērējantenu (s);  
 $S$  – attālums starp raidītāj un uztvērēj antenu (m);  
 $c$  – gaismas ātrums vakuumā (m/s);  
 $t_d$  – relatīvā laika atšķirība (s).

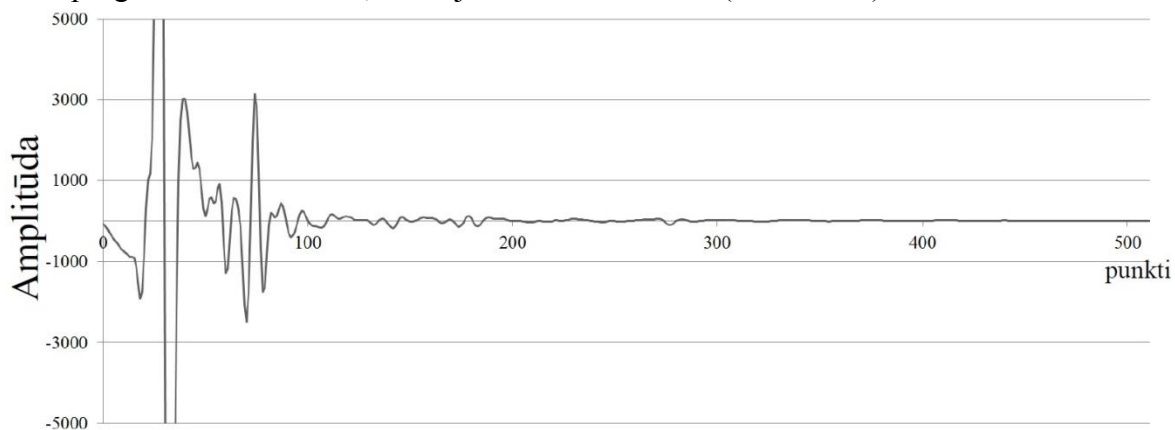
Aprakstītā metode tika eksperimentāli pārbaudīta vairākos pētījumu objektos, un iegūtie rezultāti liecināja, ka to ir iespējams veiksmīgi pielietot salīdzinoši precīzas laika korekcijas vērtības aprēķinos (Karušs, 2014b). Rezultātā aprakstītā metode tika pielietota visos disertācijā aprakstītajos detalizētu pētījumu objektos.

### 2.3.6. Radiolokācijas datu attēlošana un analīze, izmantojot izklājlapu un datu statistiskās apstrādes datorprogrammas

Datorprogrammā Prism 2.5 laiks, pēc kura saņemts kāds konkrēts atstarojums, tiek noteikts ar datorpeles palīdzību, atzīmējot konkrēto vietu radarogrammā, kura pēc datu analizētāja domām atbilst momentam, kad ir ticis saņemts atstarojums. Atzīmējams, ka šāda mērījumu veikšana nav viennozīmīga. Piemēram, pat nedaudz neprecīzi identificējot punktu radarogrammā, kuram atbilst saņemtā atstarojuma pirmā pusperioda maksimālā amplitūda, nolasītā laika vērtība no patiesās var atšķirties līdz pat 2 ns. Pieņemot, ka nogulumiem raksturīgā  $\epsilon$  vērtība ir vienāda ar 72, tas atbilst 7 cm kļūdai. Šāda pieeja ir pieļaujama gadījumos, kad nav nepieciešams veikt augstas precizitātes aprēķinus. Taču gadījumos, kad pētījuma mērķa realizēšanai nepieciešams veikt maksimāli precīzus mērījumus, šāda metode nav izmantojama.

Precīzākus laika, pēc kura saņemts kāds konkrēts atstarojums, mērījumus ir iespējams veikt, izmantojot datorprogrammas, ar kurām ir iespējama skaitlisku datu grafiska attēlošana. Pie šādām datorprogrammām ir pieskaitāmas tādas datorprogrammas kā R, MATHEMATICA, MS Excell, iWork u.c..

Disertācijā aprakstītā pētījuma izstrādes gaitā laika, pēc kura saņemti atstarojumi, noteikšana tika realizēta, vizualizējot iegūtos radiolokācijas zondējumus MS Excell datorprogrammā. Iegūtie zondējumi, izmantojot datorprogrammu Prism 2.5, tika eksportēti no \*.sgy datu formāta faila uz \*.txt datu formāta failu (Zolotarev, 2007). Tālāk, izmantojot datorprogrammu MS Excell, zondējumi tika vizualizēti (2.13. attēls).



2.13. attēls. Radiolokācijas zondējuma attēlošana MS Excell datorprogrammā  
 Figure 2.13. A visualization of one GPR trace using MS Excell software

Būtiski, ka pirms radiolokācijas mērījumu eksportēšanas uz \*.txt datu formātu, iegūtajiem radiolokācijas signāliem tika noņemts pastiprinājums. Tas tika darīts, jo pastiprinājuma funkcijas pielietošana var ietekmēt saņemtā atstarojuma formu, kas savukārt var mainīt laiku, pie kura tiek identificēts saņemtā atstarojuma amplitūdas maksimums.

Iegūtie dati \*.txt datu formāta satur informāciju par ģeoradara signāla amplitūdas vērtībām pie veiktajiem mērījumu punktiem nevis laika vērtībām (1.2.2. nodaļa). Rezultātā, izmantojot aprakstīto datu attēlošanas veidu, ir iespējams ar augstu precizitāti noteikt mērījuma punktu, kas atbilst saņemtā atstarojuma pirmā pusperioda amplitūdas maksimumam. Tālāk laiku, kas atbilst noteiktajam punktam, var aprēķināt, izmantojot formulu 2.4.

$$t_{ats} = (s_{ats} - s_0) \cdot \left( \frac{\Delta t}{s_k} \right), \text{ kur} \quad (2.4)$$

$t_{ats}$  – laiks pēc kura saņemts atstarojums (s);

$s_{ats}$  – mērījuma punkts, pie kura fiksēts identificētā atstarojuma pirmā pusperioda amplitūdas maksimums;

$s_0$  – mērījuma punkts, pie kura fiksēts tiešā signāla pirmā pusperioda amplitūdas maksimums;

$\Delta t$  – laika logs, kas izmantots radiolokācijas zondēšanas laikā (s);

$s_k$  – mērījumu punktu skaits vienā zondējumā.

Izmantojot šādu iegūto datu attēlošanas paņēmieni, ir iespējams viennozīmīgi noteikt laiku, pēc kura saņemts identificētais atstarojums.

### 2.3.7. Dziļuma, no kura saņemts atstarojums, noteikšana

Lai būtu iespējams veikt pēc iespējas korektāku iegūto radiolokācijas signālu atstarojumu sasaisti ar nogulumu īpašību maiņu pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā, dziļums, no kura saņemti atstarojumi, ir jānosaka ar augstu precizitāti.

Disertācijas izstrādes gaitā dziļums, no kura ir saņemts kāds konkrēts atstarojums, tika aprēķināts, izmantojot formulu 2.5.

$$S = v \cdot \frac{t}{2}, \text{ kur} \quad (2.5)$$

$S$  – dziļums, no kura saņemts atstarojums (m);

$v$  – ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums nogulumu slāņos līdz atstarotājsvirsmi (m s<sup>-1</sup>);

$t$  – laiks, pēc kura saņemts atstarojums (s).

Kā redzams, precizitāte, ar kuru iespējams aprēķināt dziļumu, no kura saņemts atstarojums, ir atkarīga no precizitātes, ar kādu ir izmērīts laiks, pēc kura atstarojums ir saņemts, un no precizitātes, ar kādu ir noteikts ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums nogulumu slāņos.

Radiolokācijas profilēšanas laikā tika izmantots 500 ns laika logs (2.3.3. nodaļa). Ņemot vērā to, ka vienu radiolokācijas zondējumu veido 512 individuāli mērījumi (1.2.2. nodaļa), laiku, pēc kura ir saņemts atstarojums, izmantojot minēto laika logu, var noteikt ar precizitāti +/- 0,98 ns. Tomēr, ņemot vērā to, ka purva virsma ir salīdzinoši nelīdzena, antenu sistēmas kustība ieraksta laikā ir nevienmērīga (antenu sistēma „gāzelējās”). Tādēļ uzmanība tika pievērsta ne tikai instrumentālajai kļūdai, veicot laika mērījumus, bet arī iegūto rezultātu atkārtojamībai. Protī, vai, veicot radarogrammas ierakstu pa vienu un to

pašu radiolokācijas profilu atkārtoti, vai, izmantojot antenu sistēmu ar atšķirīgu centrālo frekvenci, laiks, pēc kura saņemti atstarojumi, neatšķirsies.

Veikto laika mērījumu atkārtojamība tika noteikta, izmantojot Cenas tīrelī iegūtos rezultātus (2.6. attēls; 4.1. attēls). Cenas tīrelī viens un tas pats radiolokācijas profils, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu, tika ierakstīts atkārtoti, veicot atkārtoto radiolokācijas profilēšanu pretējā virzienā. Tāpat izvēlētais radiolokācijas profils tika ierakstīts, izmantojot 500 MHz antenu sistēmu. Tālāk, izmantojot iegūtās radarogrammas, tika noteikts laiks, pēc kura ir saņemti subhorizontālie atstarojumi pie ierīkotajiem urbumiem. Analizējot iegūtos rezultātus, tika konstatēts, ka atšķirības starp dažādiem ierakstiem nepārsniedz 1 ns, izmantojot vienu antenu sistēmu, un 6 ns, izmantojot dažādas antenu sistēmas (2.2. tabula).

2.2. tabula. Laika, pēc kura saņemti identificētie atstarojumi, mērījumu salīdzinājums  
Laika vērtības norādītas nanosekundēs.

Table 2.2. A comparison of time delay values of identified reflections

Time values are given in nanoseconds.

Radarogramma	1. urbums		2. urbums	
	1. atstarojums	2. atstarojums	1. atstarojums	2. atstarojums
300 MHz	261	229	250	223
300 MHz 2	260	228	251	224
500 MHz	255	-	249	-

Tādējādi uzskatāms, ka iegūtie rezultāti ir atkārtojami un ir lietderīgi veikt laika, pēc kura ir saņemti atstarojumi, mērījumus ar pēc iespējas augstāku precizitāti. Rezultātā laika, pēc kura saņemti atstarojumi noteikšana, tika veikta pēc 2.3.8. nodaļā aprakstītās metodikas.

Aprēķinātais dziļumu, no kura saņemti identificētie atstarojumi, būtiski ietekmē arī aprēķinos izmantotais ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums. Analizējot iepriekšējo pētījumu rezultātus un monogrāfijas, kurās aprakstīta radiolokācijas teorija, tika secināts, ka visprecīzāk noteikt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz subhorizontālai atstarotāj virsmai iespējams, izmantojot CMP (1.2.5. nodaļa). Līdz ar to šī pētījuma gaitā ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma nogulumu slāņos mērījumi tika veikti, pielietojot minēto metodi (2.3.9. nodaļa).

Atzīmējams, ka ne visus no radiolokācijas profilēšanas gaitā ierakstītajās radarogrammās identificētajiem subhorizontālajiem atstarojumiem izdevās identificēt arī CMP mērījumu laikā iegūtajā radarogrammā. Kā rezultātā nebija iespējams aprēķināt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz ar minētajiem atstarojumiem saistītajām atstarotāj virsmām, kas liedz veikt precīzus dziļuma, no kura saņemti šie atstarojumi, aprēķinus.

Dziļums, no kura saņemti minētie atstarojumi, tika aprēķināts, izmantojot ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu, kas tika aprēķināts, izmantojot nākošo no lielāka dziļuma saņemto atstarojumu, kuru bija iespējams identificēt CMP mērījumu laikā iegūtajā radarogrammā. Rezultātā dziļums, no kura saņemti aprakstītie atstarojumi, tika aprēķināts ar zemāku precizitāti. Autora pētījuma gaitā minētie atstarojumi tika identificēti kā atstarojumi, kuru dziļums aprēķināts ar zemāku precizitāti.

Disertācijas izstrādes gaitā dziļums, no kura saņemti identificētie atstarojumi, tika aprēķināts, izmantojot iepriekš aprakstīto metodiku. Papildus katram no atstarojumiem, kas saņemti no kūdras slāņa iekšienes, izmantojot autora izstrādāto un šajā disertācijā apskatīto



metodi (2.3.10. nodaļa), tika aprēķināts dziļuma intervāls, kurā iegū ar tiem saistītās nogulumu slāņu robežas.

### **2.3.8. Laika, pēc kura saņemts radiolokācijas signāla atstarojums, noteikšana**

Šī pētījuma gaitā visos gadījumos laiks, pēc kura ir saņemts kāds konkrēts atstarojums, tika noteikts, izmantojot signāla pirmā pusperioda maksimumu.

Laiks, pēc kura saņemti identificētie atstarojumi, tika noteikts pie katra no ierīkotajiem urbumiem, izmantojot radiolokācijas profilēšanas gaitā iegūto radarogrammu. Pie katra no ierīkotajiem urbumiem laiks, pēc kura saņemti identificētie atstarojumi, tika noteikts uz 10 zondējumiem, izmantojot datu attēlošanu MS Excell datorprogrammā (2.3.6. nodaļa). Tālākos aprēķinos tika izmantotas vidējās vērtības no šiem laika mērījumiem, kurām tika pieskaitīta laika korekcija (2.3.5. nodaļa).

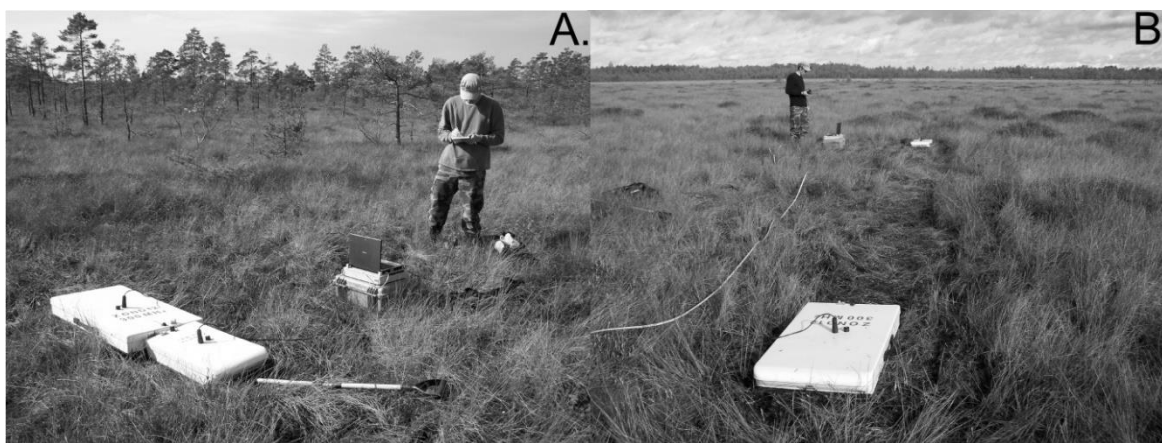
Atzīmējams, ka ne visus identificētos subhorizontālos atstarojumus bija iespējams izsekot atsevišķos zondējumos pie katra no ierīkotajiem urbumiem. Šajos gadījumos laiks, pēc kura ir saņemti minētie atstarojumi, tika noteikts datorprogrammā Prism 2.5, izsekojot tos no radarogrammas zonām, kur tie ir skaidri identificējami, līdz urbumiem atbilstošajām vietām. Ņemot vērā to, ka šādā veidā noteiktais laiks, pēc kura saņemts atstarojums, ir salīdzinoši neprecīzs, arī aprēķinātais dziļums, no kura saņemts atstarojums, ir neprecīzs. Veiktā pētījuma gaitā minētie atstarojumi tika identificēti kā atstarojumi, kuru dziļums aprēķināts ar zemāku precizitāti.

### **2.3.9. Ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma nogulumu slāņos noteikšana**

Lai būtu iespējams aprēķināt dziļumu, no kura saņemti ģeoradara signāla atstarojumi ar augstu precizitāti, ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumi tika veikti, izmantojot CMP (1.2.5. nodaļa).

Kopumā atzīmējams, ka zinātniskajā literatūrā ir atrodami tikai vispārīgi CMP apraksti (Jol, 2009; Reynolds, 1997). Tāpat publikācijās, kurās aprakstīti purvu nogulumu pētījumi ar radiolokācijas metodi, gadījumos, kad izmantota CMP, precīza eksperimenta norises gaita un aprēķinu metodika netiek aprakstīta (Comas et al., 2011b; Mustgrave, Binley, 2011; Plado et al., 2011; Lowry et al., 2009). Atsevišķās publikācijās ir atrodams detalizēts metodikas apraksts (Parsekian et al., 2010), tomēr vairāki būtiski lauka darbu metodikas un aprēķinu metodikas aspekti nav aprakstīti. Ņemot vērā iepriekš minēto, disertācijas autors ir pilnībā izstrādājis CMP lauka darbu un iegūto datu aprēķinu metodiku, kas ļauj iegūt maksimāli precīzus ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumus.

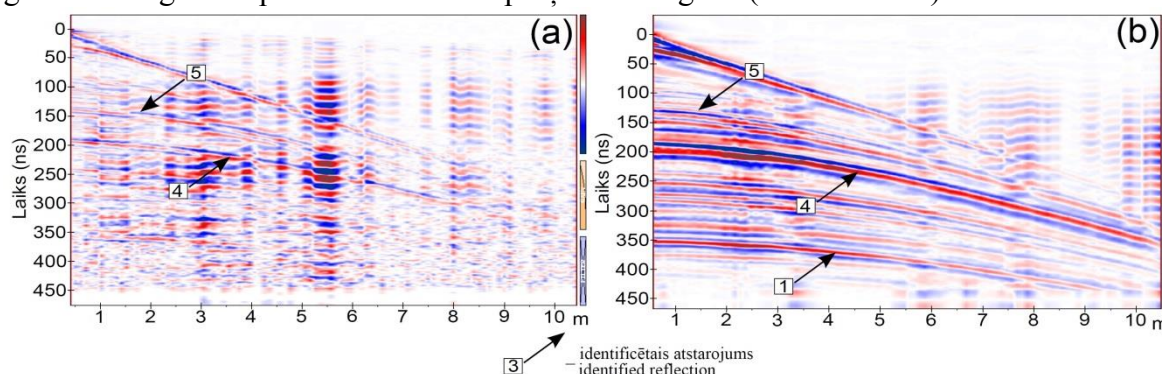
Tā kā šī pētījuma gaitā izmantotā 300 MHz antenu sistēmas konstrukcija neļauj mainīt attālumu starp raidītāntenu un uztvērēntenu, CMP tika realizēta, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu kā raidītāju, bet 500 MHz antenu sistēmu kā uztvērēju (2.14. attēls).



2.14. attēls. Antenu novietojums CMP mērījumu veikšanas sākumā (A) un beigās (B) (A. Ņelājeva foto, 2012. gada augusts)

Figure 2.14. Placement of antennas at the beginning (A) and the end (B) of CMP measurements (Photo by A. Ņelājevs, August of 2012)

Atzīmējams, ka Makinu purvā un Laugas purvā CMP mērījumu gaitā, izmantojot minētās antenu sistēmas, iegūtie atstarojumi bija salīdzinoši vāji, kas liedza veikt ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma aprēķinus (2.15. attēls. a). Šajos gadījumos CMP mērījumi tika veikti atkārtoti, izmantojot 100 MHz antenu sistēmu. Abos gadījumos atkārtotajos CMP mērījumos tika iegūti pietiekoši spēcīgi atstarojumi, un tos bija iespējams izmantot ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma aprēķināšanas gaitā (2.15. attēls. b).



2.15. attēls. Makinu purvā CMP mērījumu veikšanas laikā iegūtās radarogrammas, a) izmantojot 300 MHz un 500 MHz antenu sistēmas, b) izmantojot 100 MHz antenu sistēmu

Figure 2.15. Radar images of the bog Makinu obtained during the CMP experiment using (a) 300 MHz and 500 MHz antenna system, (b) 100 MHz antenna system

Veiktā pētījuma gaitā tika pieņemts, ka ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums nogulumu slāņos laterālā virzienā ir nemainīgs. Līdz ar to katrā pētījumu objektā CMP mērījumi tika veikti tikai vienā vietā. Izvēloties vietu, kur veikt CMP mērījumus, visos pētījumu objektos tika ņemti vērā vairāki priekšnoteikumi:

- Tika ņemti vērā radiolokācijas profilēšanas laikā iegūtie rezultāti. CMP mērījumi tika veikti vietā, kurā iegūtajā radarogrammā visi identificētie subhorizontālie atstarojumi bija skaidri izteikti.
- Eksperiments tika realizēts pēc iespējas tuvāk kādam no ierīkotajiem urbumiem. Tas nodrošināja to, ka gadījumā, ja pētījuma gaitā tiktu konstatēts, ka ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ir mainīgs laterālā virzienā, būtu iespējams veikt augstas precizitātes iegūto atstarojumu korelāciju ar nogulumu īpašību maiņu griezumā vismaz pie viena urbuma.

- Tāpat eksperiments tika veikts pēc iespējas līdzenākā vietā, lai nodrošinātu maksimāli ciešu antenu sistēmu kontaktu ar zemes virsmu visā eksperimenta gaitā.

Mērījumu sākumā antenas tika novietotas blakus tā, lai starp raidītāj un uztvērēj antenu būtu mazākais iespējamais attālums (izmantojot minētās antenu sistēmas, tas ir 42 cm) (2.14. attēls. a). Pēc tam antenas tika attālinātas viena no otras ar soli 10 cm, pie katra fiksētā attāluma veicot vienu diskretu zondējumu. Antenas tika attālinātas vidēji līdz 10 m attālumam (2.14. attēls. b).

Ņemot vērā to, ka abu antenu atvirzīšana par pieciem centimetriem katrā solī ir salīdzinoši sarežģīta, antenas tika atvirzītas pamīšus par 10 cm. Rezultātā viduspunkts starp abām antenu sistēmām neatradās vienā punktā – tas pusē no veiktajiem zondējumiem bija novirzīts no sākotnējā viduspunkta par 10 cm. Tomēr, tā kā pētījumi tika realizēti vietās, kur iegūtajās radarogrammās identificētie informatīvie atstarojumi bija subhorizontāli un izturēti visā pētījumu teritorijā, nav sagaidāms, ka iepriekš minētais ietekmēs ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma aprēķinu precizitāti.

CMP mērījumu laikā iegūtās radarogrammas tika apstrādātas datorprogrammā Prism 2.5, līdzīgi kā radiolokācijas profilēšanas gaitā iegūtās radarogrammas (2.3.4. nodaļa).

Lai būtu iespējama maksimāli precīza ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma noteikšana pētītajā griezumā, laiks, pēc kura ir saņemti atstarojumi CMP, mērījumu gaitā ir jānosaka ar pēc iespējas augstāku precizitāti. Datorprogrammā Prism 2.5 laika, pēc kura ir saņemti iegūtie signāli, noteikšana nav viennozīmīga, tāpēc laika, pēc kura saņemti atstarojumi, noteikšanu tika izvēlēts veikt datorprogrammā MS Excell (2.3.6. nodaļa). Pirms tālākas noteikto laika vērtību izmantošanas aprēķinos tās tika koriģētas, izmantojot aprēķināto „move-out correction” vērtību (2.3.5. nodaļa).

Tālāk, izmantojot iegūtos datus, ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums līdz konkrētai nogulumu slāņu robežai tikai aprēķināts, izmantojot grafisko metodi (1.2.5. nodaļa).

### 2.3.10. Dziļuma intervāla metode

Dziļums, no kura saņemti identificētie atstarojumi, tika aprēķināts, izmantojot 2.3.7. nodaļā aprakstīto metodiku. Tomēr, izmantojot šāda veida metodiku, ir salīdzinoši sarežģīti identificēt iespējamās rupjas kļūdas aprēķinos vai mērījumu veikšanas gaitā. Tādēļ pētījuma gaitā tika izstrādāta metode, ar kuras palīdzību ir iespējams identificēt dziļuma intervālu, kurā ir jāieguļ robežai, ar kuru ir saistīts identificētais atstarojums.

Izmantojot formulu 2.6, veiktos radiolokācijas mērījumus un urbumā noteikto purva gultnes dziļumu, ir iespējams aprēķināt vidējo  $\epsilon$ , kas raksturīga purvam pie konkrētā urbuma.

$$\epsilon_{vid} = \left( \frac{c \cdot t}{S} \right)^2, \text{ kur} \quad (2.6)$$

$\epsilon_{vid}$  – vidējā dielektriskā caurlaidība purva griezumā;

$S$  – purva biezums (m);

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$t$  – laiks, pēc kura saņemts atstarojums, kas saistīts ar purva gultni (s).

Minēto koeficientu nevar izmantot, lai precīzi aprēķinātu dziļumu, no kāda saņemti citi no kūdras slāņa iekšpuses saņemtie atstarojumi. Tomēr šo vidējo  $\epsilon$  var izmantot, lai aprēķinātu

dziļuma intervālu, kurā iegūļ robežas, ar kurām ir saistīti pārējie radiolokācijas signāla atstarojumi, kas ir saņemti no kūdras slāņa iekšpuses.

Tā, piemēram, purvā, kas ir veidots no diviem kūdras slāņiem, vidējo  $\varepsilon$  vērtību var izteikt ar formulu 2.7.

$$\varepsilon_{vid} = \left( \frac{c \cdot t_d}{S_1 + S_2} \right)^2 = \left[ c \cdot t_d \cdot \left( \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_1}} \cdot t_1 + \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_2}} \cdot t_2 \right)^{-1} \right]^2, \text{ kur} \quad (2.7)$$

$\varepsilon_{vid}$  – vidējā dielektriskā caurlaidība purva griezumā;

$\varepsilon_1$  – pirmajam kūdras slānim raksturīgā  $\varepsilon$ ;

$\varepsilon_2$  – otrajam kūdras slānim raksturīgā  $\varepsilon$ ;

$S_1$  – pirmā kūdras slāņa biezums (m);

$S_2$  – otrā kūdras slāņa biezums (m);

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$t_d$  – laiks, pēc kura saņemts atstarojums, kas saistīts ar purva gultni (s);

$t_1$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls šķērsotu pirmo kūdras slāni (s);

$t_2$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls šķērsotu otro kūdras slāni (s).

Izmantojot iegūtos radiolokācijas mērījumus, ir iespējams noteikt gan  $t_1$  gan  $t_2$ . Taču gan  $\varepsilon_1$  gan  $\varepsilon_2$  noteikt nav iespējams, jo ar dažādiem šo vērtību pāriem ir iespējams iegūt vienu un to pašu  $\varepsilon_{vid}$  vērtību. Tomēr, nosakot maksimālo iespējamo  $\varepsilon$  vērtību kūdrā un to piemērojot  $\varepsilon_2$  vērtībai, ir iespējams aprēķināt minimālo iespējamo  $\varepsilon_1$  vērtību.

Iepriekšējos pētījumos ir konstatēts, ka kūdrai raksturīgā  $\varepsilon$  ir tuva ūdenim raksturīgajai  $\varepsilon$ , taču nekad to nepārsniedz (Lowry et al., 2009). Sekojoši, pielietojot aprakstīto metodi, tika pieņemts, ka maksimālā iespējamā  $\varepsilon$  vērtība kūdrā ir vienāda ar ūdenim raksturīgo  $\varepsilon$  vērtību (1.1.2. nodaļa). Rezultātā, izmantojot formulu 2.8, ir iespējams aprēķināt minimālo iespējamo  $\varepsilon_1$  vērtību.

$$\varepsilon_{1min} = \left[ \sqrt{\varepsilon_{vid}} \cdot \frac{t_1}{t_d} \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt{\varepsilon_{vid}}}{\sqrt{\varepsilon_{max}}} + \frac{t_1}{t_d} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_{vid}}}{\sqrt{\varepsilon_{max}}} \right)^{-1} \right]^2, \text{ kur} \quad (2.8)$$

$\varepsilon_{vid}$  – vidējā dielektriskā caurlaidība purva griezumā;

$\varepsilon_{1min}$  – minimālā iespējamā  $\varepsilon$  vērtība pirmajam slānim;

$\varepsilon_{max}$  – maksimālā iespējamā  $\varepsilon$  vērtība kūdrā;

$t_d$  – laiks, pēc kura saņemts atstarojums, kas saistīts ar purva gultni (s);

$t_1$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls šķērsotu pirmo kūdras slāni (s).

Tālāk, izmantojot aprēķināto  $\varepsilon_{1min}$  vērtību un pieņemto  $\varepsilon_{max}$  vērtību, ir iespējams aprēķināt maksimālo un minimālo pirmā slāņa biezumu, kas ļauj noteikt dziļumu, kādā var atrasties robeža, kas nodala pirmo un otro kūdras slāni (formula 2.9 un formula 2.10).

$$h_{1min} = t_1 \cdot \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{max}}}, \text{ kur} \quad (2.9)$$

$h_{1min}$  – minimālais iespējamais pirmā slāņa biezums (m);

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\varepsilon_{max}$  – maksimālā iespējamā  $\varepsilon$  vērtība kūdrā;

$t_1$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls šķērsotu pirmo kūdras slāni (s).

$$h_{1\max} = t_1 \cdot \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{1\min}}}, \text{ kur} \quad (2.10)$$

$h_{1\max}$  – maksimālais iespējamais pirmā slāņa biezums (m);

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\epsilon_{\max}$  – maksimālā iespējamā  $\epsilon$  vērtība kūdrā;

$t_1$  – laiks, kas bija nepieciešams, lai ģeoradara signāls šķērsotu pirmo kūdras slāni (s).

Apvienojot formulu 2.9 un formulu 2.10, var aprēķināt dziļuma intervāla platumu, kurā iegul minētā robeža (formula 2.11).

$$\Delta h = c \cdot t_d \cdot \left( \frac{\sqrt{\epsilon_{\max}} - \sqrt{\epsilon_{\text{vid}}}}{\sqrt{\epsilon_{\max}} \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{vid}}}} \right) = S \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{vid}}}}{\sqrt{\epsilon_{\max}}} \right), \text{ kur} \quad (2.11)$$

$\Delta h$  – atšķirība starp minimālo un maksimālo iespējamo dziļumu, kurā iegul robeža starp pirmo un otro kūdras slāni (m);

$c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $\text{m s}^{-1}$ );

$\epsilon_{\text{vid}}$  – vidējā dielektriskā caurlaidība purva griezumā;

$\epsilon_{\max}$  – maksimālā iespējamā  $\epsilon$  vērtība kūdrā;

$t_d$  – laiks, pēc kura saņemts atstarojums, kas saistīts ar purva gultni (s);

$S$  – purva biezums (m).

Vairumā gadījumu purvu veido vairāk kā divi slāņi, taču arī šādos gadījumos ir iespējams aprēķināt minimālo iespējamo  $\epsilon$  vērtību katram kūdras slānim, izmantojot formulu 2.8. Minētajos gadījumos tiek pieņemts, ka visiem pārējiem slāņiem raksturīgā  $\epsilon$  vērtība ir vienāda ar noteikto  $\epsilon_{\max}$  vērtību, kā rezultātā situācija ir analoga divu slāņu modelim.

Lai aprēķinātu minimālo un maksimālo dziļumu, kādā iegul katra konkrētā robeža, no kuras ir notikusi radiolokācijas signāla atstarošanās purvā, kas veidots no vairāk kā diviem kūdras slāņiem, nepieciešams veikt komplicētākus aprēķinus nekā divu slāņu gadījumā. Tā, piemēram, lai aprēķinātu minimālo iespējamo dziļumu, kādā iegul kāda robeža, ir jāsummē visu minētajai robežai uzguļošo slāņu minimālie iespējamie biezumi (formula 2.12).

$$S_{\min n} = \sum_{i=1}^n h_{\min i}, \text{ kur} \quad (2.12)$$

$S_{\min n}$  – minimālais iespējamais dziļums, kādā iegul  $n$  robeža (m);

$h_{\min i}$  –  $i$  slāņa minimālais iespējamais biezums (m);

$i$  – slāņa numurs;

$n$  – robežas numurs.

Savukārt, lai aprēķinātu maksimālo iespējamo dziļumu, kādā iegul kāda robeža, ir jāsummē visu minētajai robežai uzguļošo slāņu maksimālie iespējamie biezumi (formula 2.13).

$$S_{\max n} = \sum_{i=1}^n h_{\max i}, \text{ kur} \quad (2.13)$$

$S_{\max n}$  - maksimālais iespējamais dziļums, kādā iegūl n robeža (m);  
 $h_{\max i}$  – i slāņa maksimālais iespējamais biezums (m);  
 $i$  – slāņa numurs;  
 $n$  – robežas numurs.

Veicot šādus aprēķinus, ir iespējams iegūt salīdzinoši plašus dziļuma intervālus, kuros iegūl robežas, no kurām ir notikusi ģeoradara signāla atstarošana (2.16. attēls). Rezultātā iegūtie intervāli nav praktiski pielietojami, lai izslēgtu rupjas kļūdas no aprēķiniem. Tomēr šādu pašu kūdras slāņu minimālo un maksimālo iespējamo biezumu summēšanu var veikt arī virzienā no purva gultnes uz augšu (formula 2.14 un formula 2.15). Kā rezultātā tiek iegūti atšķirīgi dziļuma intervāli (2.16. attēls).

$$S_{\min n} = S - \sum_{i=n+1}^m h_{\max i}, \text{ kur} \quad (2.14)$$

$S_{\min n}$  - minimālais iespējamais dziļums, kādā iegūl n robeža (m);  
 $h_{\max i}$  – i slāņa maksimālais iespējamais biezums (m);  
 $S$  – purva biezums (m);  
 $i$  – slāņa numurs;  
 $n$  – robežas numurs;  
 $m$  – slāņu skaits purvā.

$$S_{\max n} = S - \sum_{i=n+1}^m h_{\min i}, \text{ kur} \quad (2.15)$$

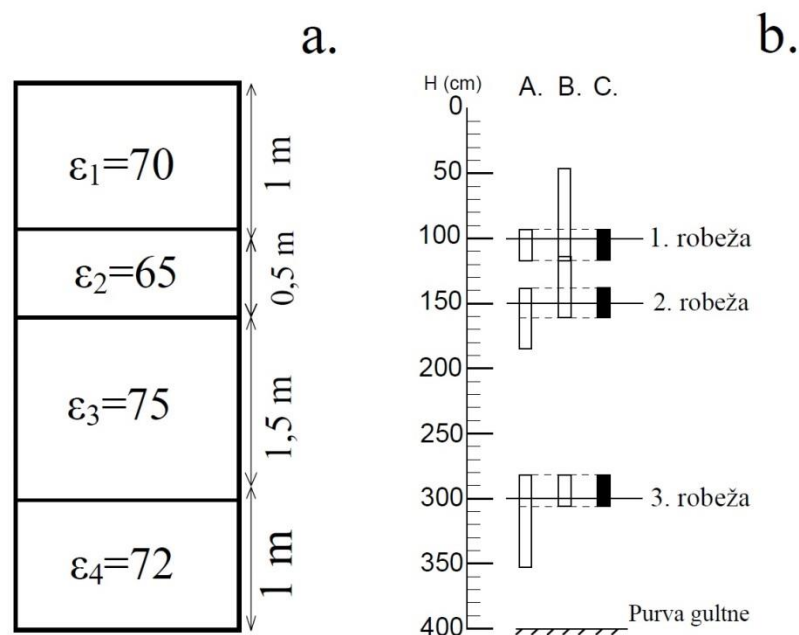
$S_{\max n}$  - maksimālais iespējamais dziļums, kādā iegūl n robeža (m);  
 $h_{\min i}$  – i slāņa minimālais iespējamais biezums (m);  
 $S$  – purva biezums (m);  
 $i$  – slāņa numurs;  
 $n$  – robežas numurs;  
 $m$  – slāņu skaits purvā.

Ņemot vērā to, ka dziļumiem, kuros iegūl meklētās robežas, ir jāapmierina abi summēšanas virzieni, dziļuma intervāli, kuros iegūl meklētās robežas tiek iegūti, apvienojot intervālus, kas tika aprēķināti, summējot slāņus virzienā uz leju un intervālus, kas tika aprēķināti, summējot slāņus virzienā uz augšu (2.16. attēls).

Izmantojot ar formulu 2.11 aprēķināto  $\Delta h$  vērtību un apvienojot formulas 2.12, 2.13, 2.14 un 2.15, var aprēķināt dziļuma intervālus, kuros iegūl katra ar ģeoradara signāla atstarojumu saistītā robeža (formula 2.16).

$$S_i = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\max}}} \cdot t_i + \frac{\Delta h}{2} \pm \frac{\Delta h}{2}, \text{ kur} \quad (2.16)$$

$S_i$  – dziļums, kurā iegūl i robeža (m);  
 $c$  – elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums vakuumā ( $m \cdot s^{-1}$ );  
 $\epsilon_{\max}$  – maksimālā iespējamā  $\epsilon$  vērtība kūdrā;  
 $t_i$  – laiks, pēc kura saņemts atstarojums, kas saistīts ar i robežu (s);  
 $\Delta h$  – atšķirība starp minimālo un maksimālo iespējamo slāņa biezumu (m).



2.16. attēls. Purva četru kūdras slāņu modelis (a) un tam atbilstoši aprēķinātie dziļuma intervāli (b)

Apzīmējumi: A – dziļuma intervāli, kas aprēķināti, izmantojot formulas 3.12 un 3.13; B – dziļuma intervāli, kas aprēķināti, izmantojot formulas 3.14 un 3.15; C – apvienotie intervāli, kuros jāieguļ interesējošām robežām.

Figure 2.16. A four layer bog model (a) and its corresponding calculated depth intervals (b)  
 Legend: A – depth intervals calculated using formulas 3.12 and 3.13; B - depth intervals calculated using formulas 3.14 and 3.15; C – overlapping parts of both intervals expected to contain borders of interest.

Aprakstītā metode tika pārbaudīta, izmantojot Cenas tīrelī veiktos radiolokācijas mērījumus un ģeoloģiskos pētījumus (Karušs, In press b). Pārbaudes laikā iegūtie rezultāti liecina par to, ka aprakstīto metodi ir iespējams pielietot, lai identificētu ģeoradara signāla atstarojuma dziļuma kļūdainus aprēķinus.

## 2.4. Ģeoloģiskie pētījumi

Lai būtu iespējams sasaitīt iegūtos radiolokācijas signālu atstarojumus ar pētījumu teritorijā sastopamo nogulumu fizikālo īpašību maiņu ģeoloģiskajā griezumā, disertācijas izstrādes gaitā gar ierīkotajiem radiolokācijas profiliem tika ierīkoti urbumi.

### 2.4.1. Urbumu novietojums

Urbumu ierīkošanas vietas tika izvēlētas, ņemot vērā iegūtos radiolokācijas mērījumus. Urbumi tika ierīkoti vietās, kur ierakstītajās radarogrammās ir iespējams viennozīmīgi izšķirt visus identificētos subhorizontālos atstarojumus. Tāpat uzmanība tikai pievērsta tam, lai, izmantojot no ierīkotajiem urbumiem iegūtos datus, būtu iespējams korekti raksturot pētījumu teritorijas ģeoloģisko griezumā visā radiolokācijas profila garumā.

Atzīmējams, ka Cenas tīrelī un Laugas purvā gar radiolokācijas profila līniju tika ierīkoti vairāki urbumi ar konstantu savstarpējo attālumu, detalizētu nogulumu īpašību izmaiņu raksturošanai pētījumu teritorijā laterālā virzienā.

Ierīkoto urbumu novietojums relatīvi radiolokācijas profila sākumpunktam tika piefiksēts, izmantojot mērlenti.

#### 2.4.2. Urbumu ierīkošana

Urbšana tika veikta, izmantojot mīksto nogulumu urbi (Russian corer). Izmantotā urbja kameras garums ir 50 cm un diametrs 5 cm. Urbšanas laikā urbis tiek iespiests purva nogulumos līdz nepieciešamajam dziļumam, un, pagriežot urbi par 180°, tiek noņemts purva nogulumu monolīts, kā arī aizvērta urbja kamera.

Mīksto nogulumu urbis urbšanas laikā tika pielietots, līdz tā dziļāka iespiešana nogulumu slāņos vairs nebija iespējama. Šis dziļums tika piefiksēts, un gadījumos, kad urbja kameru nebija izdevies iespiest purva gultnē un rezultātā iegūtajā serdē identificēt tās dziļumu, tika pieņemts, ka dziļums, līdz kuram tika iespiests mīksto nogulumu urbis, atbilst purva gultnes dziļumam. Lai pārliecinātos par šo pieņēmumu, katras urbums tika turpināts ar cilpurbi, ar kuru tika noņemts purvam pagulošo nogulumu paraugs.

Pēc kameras izcelšanas no urbuma iegūtā nogulumu serde tika nofotografēta. Tālāk nogulumu serde tika ievietota speciāli sagatavotā plastmasas paliktņī (tika izmantota uz pusēm pārgriezta plastmasas caurule, uz kuras tika atzīmēts pētījumu objekts, urbuma numurs un dziļuma intervāls, no kura iegūta nogulumu serde). Pēc tam nogulumu serde kopā ar paliktņi tika rūpīgi ietīta pārtikas polietilēna plēvē, lai transportēšanas laikā tā nezaudētu mitrumu.

Iegūtie purvu nogulumu monolīti laboratorijas apstākļos tika sadalīti 5 cm garos intervālos. Paraugu lielums tika izvēlēts, ņemot vērā iegūto radiolokācijas mērījumu radiālo izšķirtspēju (1.2.3. nodaļa) – izvēlētais paraugu noņemšanas intervāls nedaudz pārsniedz ar radiolokācijas metodi iegūto mērījumu izšķirtspēju (septiņi centimetri). Katrs atsevišķais monolīta intervāls tika ievietots hermētiski noslēgtā polietilēna maisiņā.

#### 2.4.3. Laboratorijas analīzes

Šī pētījuma izstrādes sākumposmā tika analizēti līdzīgu pētījumu rezultāti un to autoru sniegtā iegūto mērījumu interpretācija (1.3.2. nodaļa). Analīzes gaitā tika konstatēts, ka vairumā gadījumu atstarojumi, kas iegūti no purva nogulumu slāņu robežām, tiek saistīti ar kūdras mitruma izmaiņām, pelnainības izmaiņām, botāniskā sastāva izmaiņām vai kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām. Sekojoši ievāktajiem kūdras paraugiem tika noteiktas un disertācijā kopumā tika apskatītas minētās fizikālās īpašības.

Mitruma daudzuma un pelnu satura analīzes pētījuma autors veica Latvijas Universitātes Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultātes Iežu pētījumu laboratorijā un Vides ķīmijas laboratorijā. Laboratorijas analīžu laikā tika izmantoti analītiskie svāri ES 225SM-DR ( $\Delta m = 0,001$  g).

Mitruma daudzuma noteikšana:

Mitruma daudzums kūdras paraugiem tika noteikts, izmantojot parauga masas zudumus žāvēšanas laikā (Krūmiņš et al., 2012). Porcelāna tīģelīšos tika ievietoti aptuveni 15 gramus smagi nogulumu paraugi. Pēc tam porcelāna tīģelīši kopā ar nogulumu paraugiem tika nosvērti un ievietoti žāvkapī. Paraugi tika žāvēti aptuveni 12 stundas 105 °C grādu temperatūrā. Pēc žāvēšanas paraugi tika nosvērti un, izmantojot formulu 2.17, tika aprēķināts paraugu mitruma daudzums.



$$W = 100 \cdot \frac{m_p - m_{sp}}{m_p}, \text{ kur} \quad (2.17)$$

W – parauga mitruma daudzums (%);  
 $m_p$  – sākotnējā parauga masa (g);  
 $m_{sp}$  – sausa parauga masa (g).

Atzīmējams, ka pētījuma sākumposmā tika konstatēts, ka, izceļot urbi no urbuma, kūdras serdes, kas tika iegūtas līdz viena metra dziļumam, strauji zaudēja ūdeni. Rezultātā nebija iespējams noteikt precīzu dabiskā mitruma daudzumu paraugiem, kas iegūti līdz viena metra dziļumam. Minētais nosaka to, ka mitruma daudzuma analīžu rezultāti uzskatāmi par precīziem paraugiem, kuri tika iegūti dziļāk kā no viena metra dziļuma.

Pelnu saturs noteikšana:

Pelnu saturs paraugiem tika noteikts, izmantojot parauga masas zudumus karsēšanas laikā (Krūmiņš et al., 2012). Analīzēm tika izmantoti gaissausie paraugi, kas tika iegūti, nosakot paraugu mitruma daudzumu. Porcelāna tīģeliši kopā ar purvu nogulumu paraugiem tika nosvērti un ievietoti mufelkrāsnī. Paraugi tika dedzināti divas stundas 800 °C grādu temperatūrā. Pēc dedzināšanas paraugi tika nosvērti, un, izmantojot formulu 2.18, tika aprēķināts paraugu pelnu saturs.

$$A = 100 \cdot \frac{m_{dp}}{m_{sp}}, \text{ kur} \quad (2.18)$$

A – parauga pelnu saturs (%);  
 $m_{dp}$  – dedzināta parauga masa (g);  
 $m_{sp}$  – sausa parauga masa (g).

Kūdras botāniskā sastāva un sadalīšanās pakāpes noteikšana:

Kūdras botāniskā sastāva analīzes un kūdras sadalīšanās pakāpes analīzes veica Anete Diņķīte SIA „Vides Konsultāciju Birojs” laboratorijā, izmantojot mikroskopisko metodi (Ozola, 2013).

## 2.5. Kartogrāfisko materiālu sagatavošana un datu apstrāde

Kūdras mitruma daudzuma, pelnu saturs, botāniskā sastāva un sadalīšanās pakāpes analīžu rezultātu apstrādei un attēlošanai tika izmantota MS Excell datorprogramma. Pētījuma gaitā ierakstītās radarogrammas tika apstrādātas un analizētas, izmantojot datorprogrammu Prism 2.5, kā arī MS Excell datorprogrammu. Pētījuma objektu novietojuma kartes tika izveidotas, izmantojot datorprogrammas ArcGIS – ArcMap 9.3 un QGIS 2.2.0-Valmiera, balstoties uz LU ĢZZF ĢIS datu bāzē pieejamajiem kartogrāfiskajiem materiāliem un lauka darbu laikā noteiktajām radiolokācijas profilu galapunktu koordinātām. Disertācijā iekļautie attēli tika sagatavoti, izmantojot datorprogrammu Inkscape, savukārt ģeoloģiskie griezumti tika zīmēti, izmantojot datorprogrammu Tilia 1.5.12. Disertācijas teksts tika sagatavots MS Word datorprogrammā.

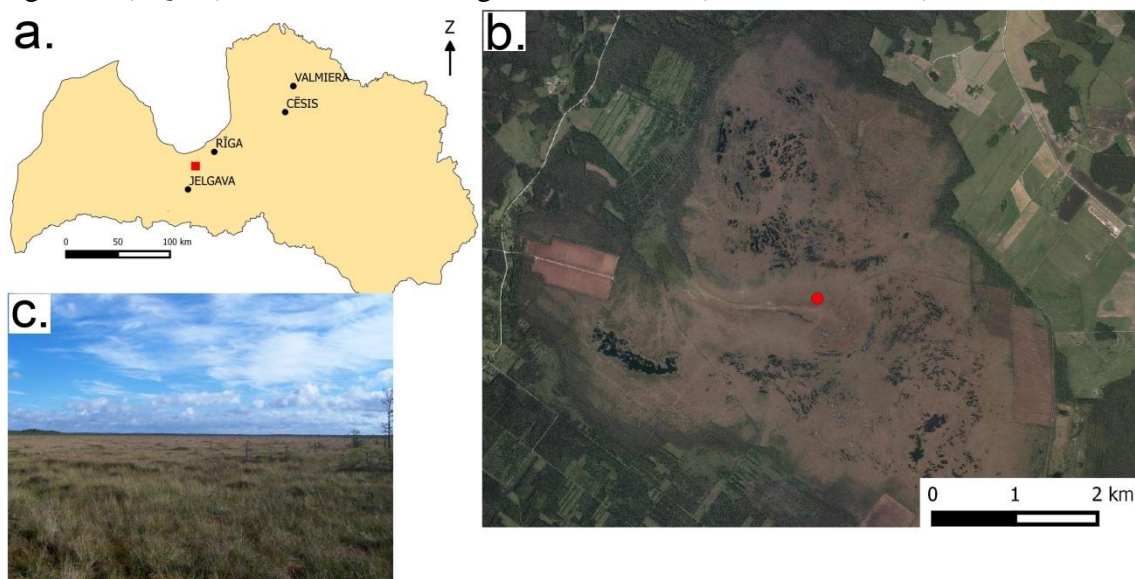
### 3. Pētījumu teritorijas raksturojums

#### 3.1. Cenas tīrelis

Cenas tīrelī tika ierīkots detalizētu pētījumu objekts, kā arī tika pilnveidota pētījumā izmantotā radiolokācijas mērījumu veikšanas un iegūto mērījumu apstrādes un analīzes metodika. Detalizētu pētījumu objekts tika ierīkots Cenas tīreļa centrālajā daļā (3.1. attēls) (Ierīkotā radiolokācijas profila Cena-1 sākumpunkta un beigu punkta koordinātas ir atbilstoši N301435; E489450 un N301478; E489466, savukārt ierīkotā radiolokācijas profila Cena-u sākumpunkta un beigu punkta koordinātas ir atbilstoši N301449; E489429 un N301490; E489440).

Cenas tīrelis atrodas aptuveni 18 km uz DR no Rīgas Viduslatvijas zemienes Tīreļu līdzenumā (3.1. attēls), kur jau pirms 11000 – 10500 gadiem bija izveidojies plašs reljefa pazeminājums (Kalniņa, 2008). Cenas tīrelī kopumā ir veikti vairāki pētījumi, kuru laikā ir gan apzināti kūdras krājumi (Bush et al., 1985), gan rekonstruēti paleoģeogrāfiskie apstākļi kūdras uzkrāšanās laikā (Kalniņa, 2008).

Purva gultni veido Baltijas ledus ezera nogulumi ( $lgQ_3ltv^b$ ). Šos nogulumus pārstāv aleirītiska un smalkgraudaina smilts, aleirīts, mālains aleirīts un mālsmilts. Purva gultnes ieplakās atsevišķās vietās virs Baltijas ledus ezera nogulumiem sastopami arī eolie nogulumi ( $vQ_3ltv$ ), kurus veido smalkgraudaina smilts (Bush et al., 1985).



3.1. attēls. Cenas tīreļa novietojums (a), pētījumu teritorijas novietojums Cenas tīrelī (b) un pētījumu teritorija (2012. gada augusts) (c)

Apzīmējumi: ar sarkanu kvadrātu apzīmēts purva novietojums; ar sarkanu apli apzīmēta pētījumu teritorija; attēla b kartogrāfiskā pamatne LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto karšu mozaīka.

Figure 3.1. Location of Cenas tīrelis (a), location of the research area in Cenas tīrelis (b) and the research area (August of 2012) (c)

Legend: with red square location of the bog is marked; with red circle location of the research area is marked; cartographic base of figure b is mosaic of LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto maps.

Purva platība ir 8983 ha, un tā lielāko daļu – 6200 ha aizņem augstā tipa purvs. Purva pamatnē ir sastopama zemā tipa purva kūdra, kuru veido koku-grīšļu, koku niedru un grīšļu sfagnu kūdra. Tomēr atsevišķās purva vietās tā rietumu daļā virs purva gultnes sastopama arī pārejas un dažviet pat augstā tipa kūdra. Pārejas tipa kūdras veido kokogrīšļu, grīšļu sfagnu un koku niedru kūdra. Atzīmējams, ka purva austrumu daļā purva gultnei

uzguļ aptuveni 0,8 m biezs sapropeļa slānis. Purva virsējo kārtu veido augstā tipa kūdra, kuras sastāvā dominē sfagnu kūdra (Kalniņa et al., 2005; Rieksts, 1994a).

Cenas tīrelī sastopamās kūdras pelnainība ir salīdzinoši maza un reti pārsniedz 5%, savukārt sadalīšanās pakāpe mainās intervālā no 10% līdz 60%. Pie tam purva pamatnē iegulošo slāņu sadalīšanās pakāpe kopumā ir liela un bieži pārsniedz 60%, kamēr purva virskārtā sastopamā augstā tipa sfagnu kūdras sadalīšanās pakāpe reti pārsniedz 15% (Kalniņa et al., 2005; Rieksts, 1994a).

Mūsdienās Cenas tīrelis ir izveidojies par salīdzinoši lielu augstā tipa purvu ar izteiktu grēdu – akaču un grēdu – liekņu mikroreljefu. Atšķirīgie hidroloģiskie apstākļi dažādās purva vietās ir sekmējusi ātrāku kūdras slāņu uzkrāšanos, kā rezultātā purvā ir iespējams izdalīt vairākus kupolus – puva neskartajā daļā ir iespējams izdalīt trīs kupolus, kuri novietoti attiecīgi teritorijas ziemeļu, austrumu un dienvidu daļā. Atzīmējams, ka purvu dienvidu daļā atrodošais kupols ir jau daļēji norakts (Kalniņa et al., 2005).

Cenas tīrelī ir izveidojušies arī salīdzinoši daudz purva ezeru. Ezeru platība vairumā gadījumu nav lielāka par diviem hektāriem, savukārt to dziļums nereti sasniedz piecus metrus. Kā lielākais ezers ir pieminams Skaista ezers, kura platība ir aptuveni 18,5 ha (Bush et al., 1985). Cenas tīrelī sastopamie ezeri nesasniedz purva gultni, kā rezultātā to pamatnes veido kūdra (Kalniņa et al., 2005).

Atzīmējams, ka Cenas tīrelī jau vairāk kā pirms 50 gadiem tika uzsākta aktīva kūdras ieguve. Šobrīd aktīva kūdras ieguve notiek purva ziemeļrietumu daļā, savukārt purva dienvidu daļā atsevišķi kūdras lauki ir izstrādāti, un ir tikusi veikta to rekultivācija (Kalniņa et al., 2005).

### 3.2. Dzelves purvs

Dzelves purvā priekšizpētes laikā tika konstatēts, ka purva centrālā daļa ir piemērota detalizētu pētījumu veikšanai. Rezultātā detalizētu pētījumu objekts tika ierīkots purva centrālajā daļā, netālu no kūdras ieguves laukiem (3.2. attēls) (Ierīkotā radiolokācijas profila Dzelve-1 sākumpunkta un beigu punkta koordinātas ir atbilstoši N343250; E530497 un N343204; E530514).

Dzelves purvs atrodas aptuveni 38 km uz ZA no Rīgas Ropažu līdzenuma ziemeļu daļā (3.2. attēls). Purvs uzguļ pēdējā apledojuma glaciolimniskajiem nogulumiem, ko apskatītajā teritorijā veido smiltis (lgQ<sub>3</sub>ltv). Tomēr atzīmējams, ka purvam piekļaujas arī teritorijas, kurās kvartāra nogulumu virsmu veido pēdējā apledojuma morēnas mālsmilts (gQ<sub>3</sub>ltv) (LVGD Kvartārģeoloģija).

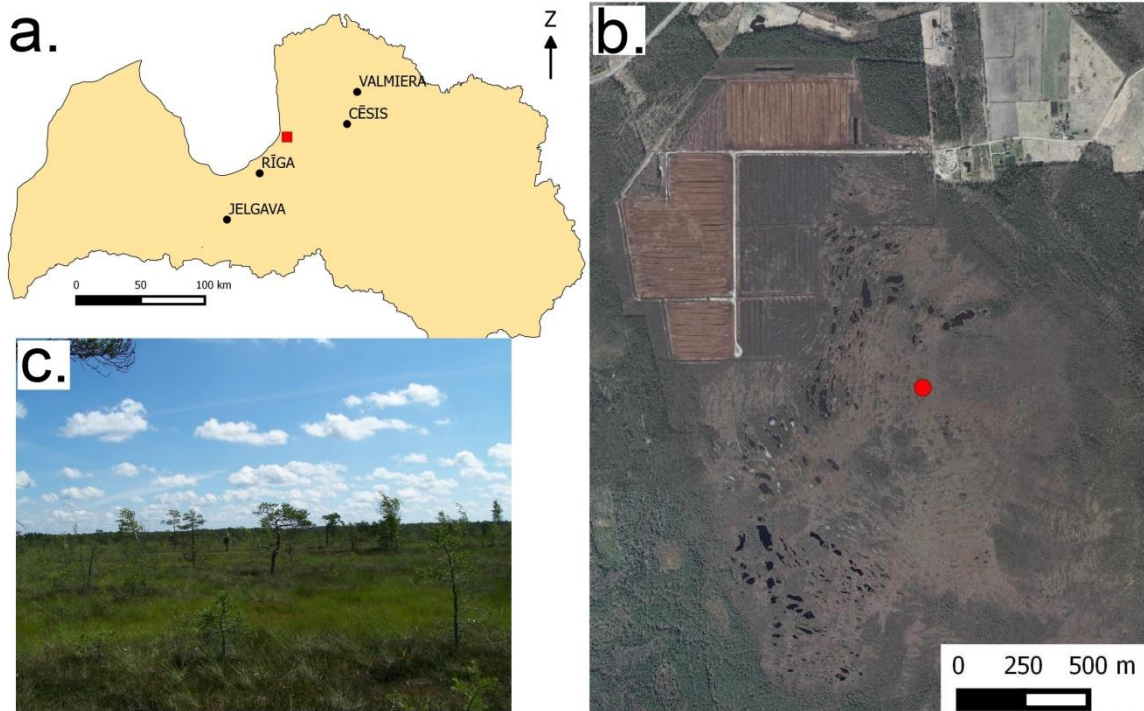
Dzelves purvā detalizētu izpēti veica Valsts meliorācijas projektēšanas institūts 1980. gadā, taču Valsts ģeoloģijas un meteoroloģijas centra fondos minētā pārskata nav, kas ir ticis atzīmēts arī citos pētījumos, kuros ir tikusi apkopota informācija par purviem Latvijā (Sičovs, 1998). Vēlāk 1998. gadā purvs tika apsekots Rīgas rajona kūdras atradņu meklēšanas un revīzijas darbos (Sičovs, 1998). Atzīmējams, ka 1998. gada apsekošanas laikā Dzelves purvā tika pielietota arī radiolokācijas metode, taču, ņemot vērā radiolokācijas iekārtu un datu apstrādes programmu attīstību pēdējos 20 gados, tā laika mērījumi nav salīdzināmi ar disertācijas gaitā veiktajiem mērījumiem. Dzelves purvā ir veikti arī pētījumi ar mērķi rekonstruēt purva attīstību (Kuške et al., 2010).

Dzelves purva platība ir 1315 ha, kā rezultātā tas ir viens no lielākajiem augstā tipa purviem Ropažu līdzenumā (Šķiņķis, 1998), purva maksimālais biezums ir 5 m, savukārt vidējais purva biezums ir 1,6 m.

Purva lielāko daļu aizņem augstā tipa purvs (1181 ha), kur augstā tipa kūdras vidējais biezums ir 1,7 m, savukārt lielākais fiksētais augstā tipa kūdras biezums ir pieci

metri (Rieksts, 1995; Kūdras fonds, 1980). Līdz viena metra dziļumam augstā tipa kūdra ir maz sadalījusies. Dziļumā, kas pārsniedz vienu metru, tā ir vidēji un labi sadalījusies.

Pārejas tipa kūdra izplatīta 26 ha. Maksimālais pārejas tipa kūdras biezums ir viens metrs, savukārt vidējais 0,5 m. Pārejas tipa kūdras sadalīšanās pakāpe variē intervālā no 25% līdz 40%. Zemā tipa kūdra izplatīta 108 ha no purva teritorijas. Maksimālais zemā tipa kūdras biezums ir divi metri, savukārt vidējais - viens metrs. Zemā tipa kūdras sadalīšanās pakāpe variē intervālā no 25% līdz 55% (Kūdras fonds, 1980).



3.2. attēls. Dzelves purva novietojums (a), pētījumu teritorijas novietojums Dzelves purvā (b) un pētījumu teritorija (D. Pipiras foto, 2013. gada jūlijs) (c)

Apzīmējumi: ar sarkanu kvadrātu apzīmēts purva novietojums; ar sarkanu apli apzīmēta pētījumu teritorija; attēla b kartogrāfiskā pamatne LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto karšu mozaīka.

Figure 3.2. Location of Dzelves bog (a), location of the research area in Dzelves bog (b) and the research area (D. Pipiras picture, July of 2013) (c)

Legend: with red square location of the bog is marked; with red circle location of the research area is marked; cartographic base of figure b is mosaic of LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto maps.

Dzelves purvā ir izveidojusies tipiska augstā tipa purva ainava ar ciņu lāmu un ciņu grēdu mikroreljefu. Purva centrālajā daļā gar purva kupola austrumu malu vērojama josla ar maziem purva ezeriņiem un akačiem. Atzīmējams, ka salīdzinoši lielu purva daļu klāj mežs (838 ha) (Kuške et al., 2010; Rieksts, 1995).

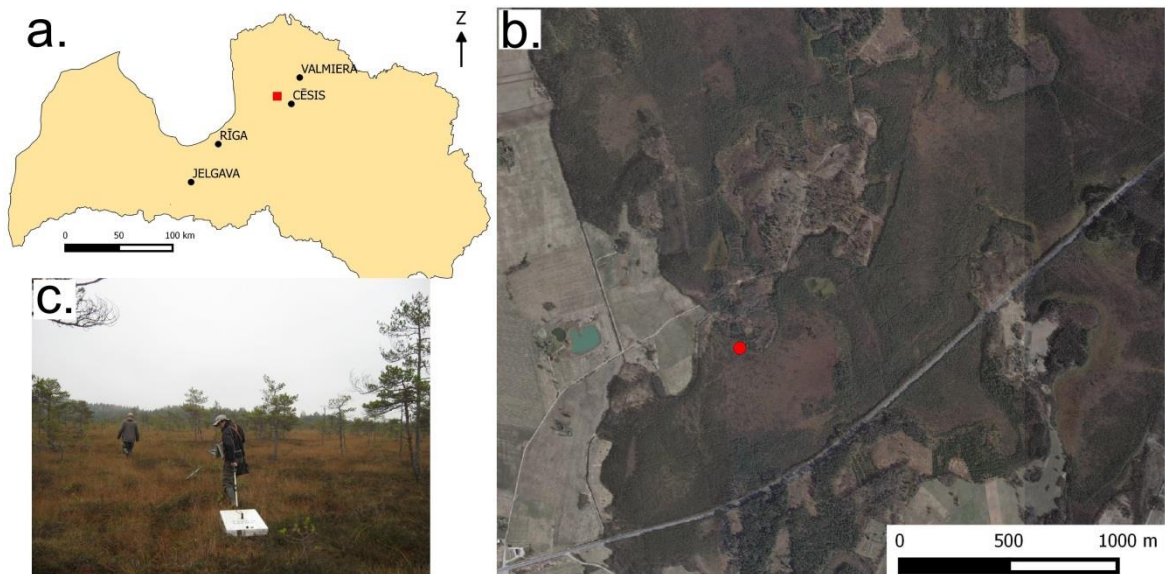
### 3.3. Makinu purvs

Makinu purvā priekšizpētes laikā tika konstatēts, ka purva ziemeļu daļa ir piemērota detalizētu pētījumu veikšanai. Rezultātā detalizētu pētījumu objekts tika ierīkots purva ziemeļu daļā (3.3. attēls) (Ierīkotā radiolokācijas profila Makinu-1 sākumpunkta un beigu punkta koordinātas ir atbilstoši N360810; E563691 un N360764; E563695).

Makinu purvs atrodas aptuveni 73 km uz ZA no Rīgas Augstozes paugurvalņa centrālajā daļā (3.3. attēls). Makinu purvs uzguļ pēdējā apledojuma morēnas mālsiltij (gQ<sub>3</sub>ltv) (LVGD Kvartārġeoloģija). Līdz šim purvs nav detalizēti pētīts, tā rekognoscija

tika veikta disertācijas sagatavošanas gaitā, kad tika konstatēts, ka Makinu purvs veido vienotu purvu sistēmu ar Daibes purvu, un tajā veikto pētījumu rezultāti var tikt attiecināti arī uz Makinu purva uzbūves raksturīgākajām iezīmēm.

Daibes purvs atrodas tieši blakus Makinu purva ziemeļaustrumu malai. Daibes purvs ir 762 ha liels augstā tipa purvs. Purvā vidējais kūdras biezums ir 3,8 m, savukārt maksimālais konstatētais dziļums ir deviņi metri. Purva gultnē vērojami vairāki pacēlumi, kā rezultātā purvs ir „sadrūmstalots” (Rieksts, 1994b). Purvu pamatā veido augstā tipa kūdra, kas līdz 2,5 m dziļumam ir maz sadalījusies, savukārt dziļāk par 2,5 m tā ir vidēji un labi sadalījusies (Kūdras fonds, 1980).



3.3. attēls. Makinu purva novietojums (a), pētījumu teritorijas novietojums Makinu purvā (b) un pētījumu teritorija (J. Vībāna foto, 2013. gada oktobris) (c)

Apzīmējumi: ar sarkanu kvadrātu apzīmēts purva novietojums; ar sarkanu apli apzīmēta pētījumu teritorija; attēla b kartogrāfiskā pamatne LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto karšu mozaīka.

Figure 3.3. Location of Makinu bog (a), location of the research area in Makinu bog (b) and the research area (J. Vībāns picture, October of 2013) (c)

Legend: with red square location of the bog is marked; with red circle location of the research area is marked; cartographic base of figure b is mosaic of LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto maps.

Daibes purvu klāj retas priežu audzes, taču vietām vērojams arī biezs priežu mežs. Purva ziemeļaustrumu daļā ir izveidojušies vairāki nelieli ezeriņi un akači (Rieksts, 1994b).

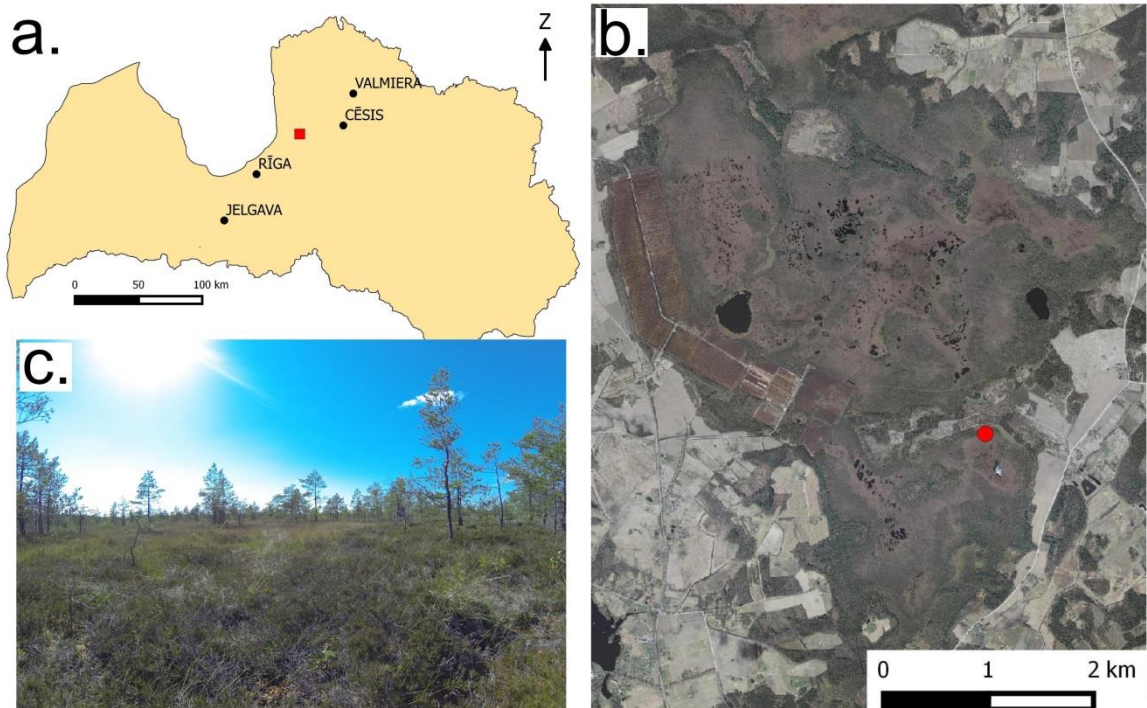
### 3.4. Laugas purvs

Detalizētu pētījumu objekts tika ierīkots Laugas purva dienvidaustrumu daļā (3.4. attēls) (Ierīkotā radiolokācijas profila Laugas-1 sākumpunkta un beigu punkta koordinātas ir atbilstoši N347012; E543540 un N346951; E543547). Laugas purvs atrodas aptuveni 50 km uz ZA no Rīgas, Metsepoles līdzenuma dienvidu daļā (3.4. attēls). Laugas purva platība ir 1244 ha, savukārt rūpnieciski izmantojamās kūdras platība ir 1200 ha (Nomals, 1943).

Purva pamatnē ieguļ smilts un mālains aleirīts (Nomals, 1943). Savukārt purva austrumu daļai piekļaujas teritorija, kurā kvartāra nogulumu virsmu veido pēdējā apledojuma fluviālie nogulumi (fQ<sub>3</sub>ltv) (LVGD Kvartārģeoloģija).

Laugas purva vidējais biežums ir 3,7 m, taču lielākais noteiktais purva biežums ir 6,5 m. Līdz divu metu dziļumam iegul maz sadalījusies sfagnu un spilvju sfagnu kūdra. Tālāk no divu metru līdz piecu metru dziļumam iegul vidēji sadalījusies spilvju sfagnu kūdra. Savukārt dziļāk par pieciem metriem iegul vidēji sadalījusies koku spilvju sfagnu un labi sadalījusies spilvju koku sfagnu kūdra, kā arī sapropelis. Vidējā kūdras celmainība ir 0,01% (Kūdras fonds, 1980; Ruks, et al., 1967; Nomals, 1943).

Laugas purvu klāj priedītes, taču vietām tas ir klajš. Atsevišķās vietās purvu klāj biezas priežu audze. Tāpat purvā ir izveidojušies vairāki ezeriņi (Ruks, et al., 1967; Nomals, 1943).



3.4. attēls. Laugas purva novietojums (a), pētījumu teritorijas novietojums Laugas purvā (b) un pētījumu teritorija (D. Bērziņa foto, 2014. gada jūlijs) (c)

Apzīmējumi: ar sarkanu kvadrātu apzīmēts purva novietojums; ar sarkanu apli apzīmēta pētījumu teritorija; attēla b kartogrāfiskā pamatne LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto karšu mozaīka.

Figure 3.4. Location of Laugas bog (a), location of the research area in Laugas bog (b) and the research area (D. Bērziņš picture, July of 2014) (c)

Legend: with red square location of the bog is marked; with red circle location of the research area is marked; cartographic base of figure b is mosaic of LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto maps.

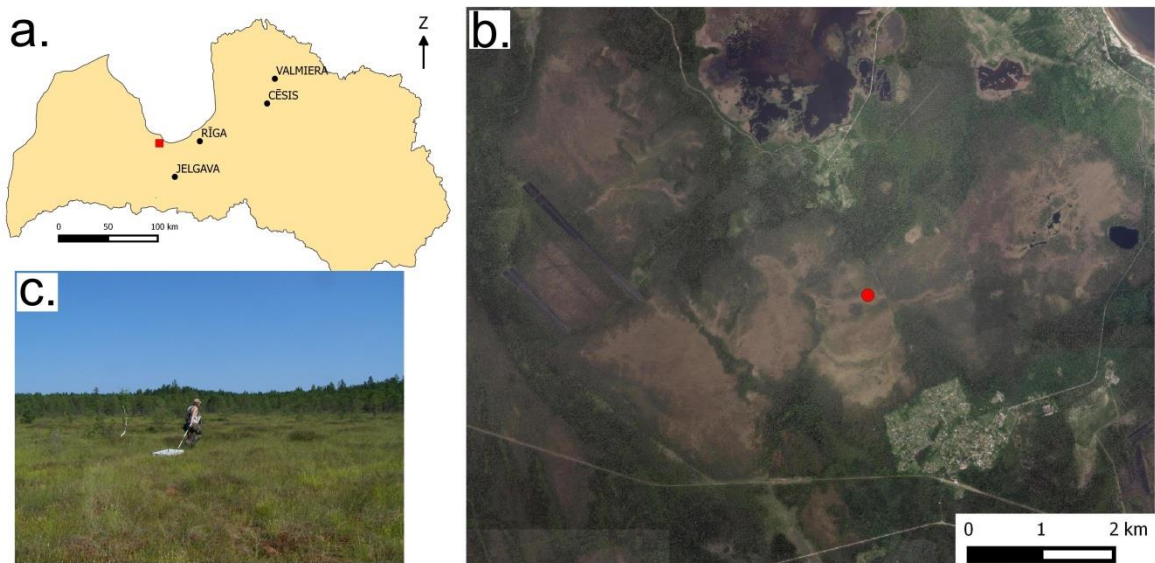
### 3.5. Raganu purvs

Raganu purvs atrodas aptuveni 39 km uz R no Rīgas, Rīgas līdzenuma rietumu daļā (3.5. attēls). Detalizētu pētījumu objekts tika ierīkots Raganu purva centrālajā daļā (Ierīkotā radiolokācijas profila Ragana-1 sākumpunkta un beigu punkta koordinātas ir atbilstoši N313227; E467783 un N313225; E467737). Lielākā daļa purva uzguļ Litorīnas jūras nogulumiem, ko apskatītajā teritorijā veido smiltis (mQ4lt). Savukārt purva rietumu daļai piekļaujas teritorijas, kurās kvartāra nogulumu virsmā atsedzas pēdējā apledojuma laikā izgulsnētie glaciolimniskie nogulumi, ko apskatītajā teritorijā veido smiltis (lgQ<sub>3</sub>ltv<sup>b</sup>) (LVGD Kvartārģeoloģija).

Raganu purvs ir augstā tipa purvs, un tas kopumā aizņem 1274 ha. Vidējais purva biezums ir 3,6 m, savukārt maksimālais konstatētais purva biezums ir seši metri. Līdz divu metru dziļumam iegul maz sadalījusies augstā tipa kūdra, kuras vidējā sadalīšanās pakāpe ir 19%. Augstā tipa kūdra, kas iegul dziļāk par diviem metriem, ir vidēji un labi sadalījusies. Maksimālā augstā tipa kūdras sadalīšanās pakāpe Raganu purvā ir 35% (Khodyrev, 1980; Kūdras fonds, 1980).

Pārejas tipa kūdras vidējā sadalīšanās pakāpe ir 32%, savukārt maksimālā konstatētā sadalīšanās pakāpe ir 45%. Zemā tipa kūdras vidējā sadalīšanās pakāpe ir 42%, savukārt maksimālā konstatētā sadalīšanās pakāpe ir 45% (Khodyrev, 1980).

Purvu klāj retas priedītes, taču purva malas zonā to sedz priežu mežs (Kūdras fonds, 1980). Purvā ir izveidojušies arī vairāki nelieli ezeriņi. Viens no lielākajiem ezeriem ir Melnezers, kura platība ir aptuveni 10,3 ha.



3.5. attēls. Raganu purva novietojums (a), pētījumu teritorijas novietojums Raganu purvā (b) un pētījumu teritorija (J. Vībāna foto, 2013. gada jūlijs) (c)

Apzīmējumi: ar sarkanu kvadrātu apzīmēts purva novietojums; ar sarkanu apli apzīmēta pētījumu teritorija; attēla b kartogrāfiskā pamatne LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto karšu mozaīka.

Figure 3.5. Location of Raganu bog (a), location of the research area in Raganu bog (b) and the research area (J. Vībāna picture, July of 2013) (c)

Legend: with red square location of the bog is marked; with red circle location of the research area is marked; cartographic base of figure b is mosaic of LĢIA Latvijas 5. etapa ortofoto maps.

Purva ziemeļu daļā purva virskārtā izplūst sērūdeņu avoti (Krauklis, 1997). Atzīmējams, ka apskatītajā teritorijā pamatiežu virsmā atsedzas Devona Salaspils svīta, kā arī Devona Pļaviņu un Daugavas svītas atsevišķās lokālās vietās (LVGD Pirmskvartāra).

## 4. Rezultāti un interpretācija

Disertācijas izstrādes gaitā detalizēti pētījumi tika veikti piecos dažādos purvos – Cenas tīrelī, Dzelves purvā, Makinu purvā, Laugas purvā un Raganu purvā. Turpmāk tiks apskatīti rezultāti, kas iegūti šajos purvos, uzmanību galvenokārt pievēršot ierakstītajās radarogrammās identificēto atstarojumu sasaistei ar nogulumu īpašību izmaiņām atbilstošā ģeoloģiskajā griezumā.

### 4.1. Cenas tīrelis

Pētījumu objektā „Cena” sākotnēji tika ierīkots 41 m garš radiolokācijas profils (3.1. nodaļa; 4.1. attēls). Lai būtu iespējams sasaistīt identificētos radiolokācijas signāla atstarojumus ar kūdras fizikālo īpašību izmaiņām pētījumu objekta ģeoloģiskajā griezumā, tieši uz radiolokācijas profila līnijas tika ierīkoti trīs urbumi (4.1. attēls). Gan radiolokācijas mērījumi, gan ģeoloģiskie pētījumi tika veikti 2012. gada augustā.

Pētījumu objektā Cena sākotnēji iegūto datu interpretācijas gaitā radās būtiskas neskaidrības, veicot identificēto atstarojumu sasaisti ar nogulumu īpašību maiņu griezumā (4.1.2. nodaļa). Sekojoši tika izvēlēts pētījumu objektā ierīkot papildus radiolokācijas profilu un ģeoloģiskos urbumus. Radiolokācijas profils Cena-u tika ierīkots paralēli radiolokācijas profilam Cena-1 aptuveni 20 m attālumā no tā. Uz radiolokācijas profila Cena-u tika ierīkoti 8 urbumi, lai būtu iespējams detalizēti noteikt nogulumu mitruma daudzuma izmaiņas pētījumu objekta ģeoloģiskā griezumā laterālā virzienā (4.3. attēls). Papildus datu iegūšana tika veikta 2014. gada aprīlī.

#### 4.1.1. Radiolokācijas mērījumi

Uz radiolokācijas profila Cena-1 radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā ģeoradara signāla atstarojumi ir identificējami līdz pat 280 ns laika atzīmei (4.1. attēls). Šajā intervālā ir iespējams identificēt salīdzinoši daudz atstarojumus, kas saistīti ar nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētījumu objekta ģeoloģiskajā griezumā. Iegūto radiolokācijas mērījumu analīzes gaitā uzmanība galvenokārt tika pievērsta sešiem subhorizontālajiem atstarojumiem, kurus ir iespējams identificēt ierakstītajā radarogrammā (4.1. attēls).

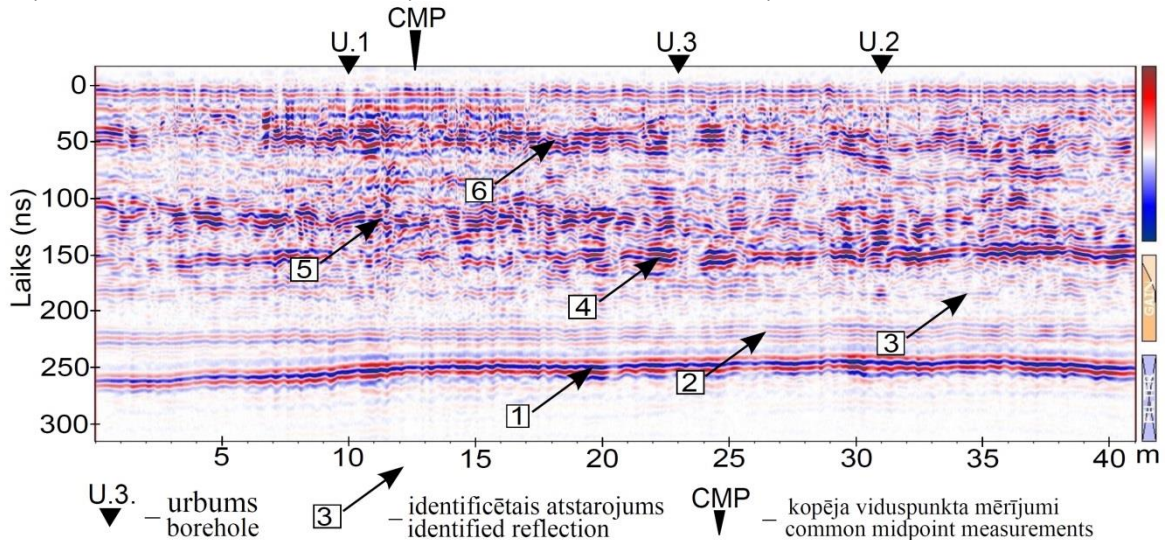
Salīdzinoši viegli visā radarogrammas garumā ir iespējams identificēt 1. ģeoradara signāla atstarojumu (4.1. attēls). Neskatoties uz to, ka identificētais atstarojums ir saņemts pēc salīdzinoši liela laika intervāla, tam ir salīdzinoši liela amplitūda, kas norāda uz to, ka tas ir saistīts ar izteiktām nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Raksturīgi, ka aprakstītais atstarojums visā radarogrammas garumā ir vienā fāzē ar tiešo signālu. Tas norāda uz to, ka nogulumiem, kas paguļ atstarotā virsmā, kas saistīta ar šo atstarojumu, ir mazāks gaismas laušanas koeficients nekā uzguļošajiem nogulumiem. Ņemot vērā aprakstītā atstarojuma īpašības, tas jau pētījuma sākumposmā tika saistīts ar purva gultni. Pētījuma gaitā sākotnēji izdarītais pieņēmums apstiprinājās (4.1.2. nodaļa).

Otrais (2) atstarojums ir izsekojams visā radarogrammā, tomēr atsevišķās vietās tā amplitūda ir salīdzinoši neliela (4.1. attēls). Ņemot vērā to, ka minētās lokālās amplitūdas izmaiņas tanīs pašās radarogrammas daļās ir vērojamas arī, apskatot 1. atstarojumu, tās visticamāk ir saistītas ar antenu sistēmas kontakta ar zemes virskārtu izmaiņām (2.2. nodaļa) nevis atstarotā virsmas, kas izraisījusi 2. atstarojumu, kontrastainības izmaiņām.



Otrā atstarojuma salīdzinoši lielā amplitūda liecina par to, ka atstarojums ir saistīts ar robežu, kas nošķir kūdras slāņus ar izteikti atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām.

Pētījumā izmantotais ģeoradars izstaro pusotru periodu garu signālu (1.2.2. nodaļa). Taču intervālā no 15 m atzīmes līdz 41 m atzīmei apskatītais atstarojums sastāv vismaz no diviem periodiem. Minētais norāda uz to, ka otrais atstarojums varētu sastāvēt no diviem atsevišķiem atstarojumiem, kas saistāmi ar salīdzinoši plānu (aptuveni viena perioda garuma – 30 cm (1.2.3. nodaļa)) nogulumu slāņa robežām. Intervālā no 1 m līdz 15 m atzīmei apskatīto atstarojumu veido pusotrs periods, kas gadījumā, ja atstarojums ir saistāms ar šādu plānu nogulumu slāni, liecina par to, ka šajā intervālā minētā nogulumu slāņa biezums nepārsniedz septiņus centimetrus (1.2.3. nodaļa).



4.1. attēls. Radarogramma Cena-1

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.1. Radar image Cena-1

Recorded with a 300 MHz antenna system.

Trešā (3) atstarojuma izsekošana visā radarogrammas garumā ir apgrūtināta (4.1. attēls). Atsevišķās radarogrammas vietās atstarojums nav identificējams (piemēram pie 13 m un 17 m atzīmes), un tā amplitūda kopumā ir salīdzinoši neliela. Minētais norāda uz atstarojuma saistību ar nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā.

Ceturtais (4) atstarojums ir izsekojams visā radarogrammas garumā (4.1. attēls). Apskatot ceturto atstarojumu, praktiski visā radarogrammas garumā nav iespējams viennozīmīgi izšķirt pusotru signāla periodu. Kopumā aprakstītais atstarojums radarogrammā ir identificējams kā zona ar vairākiem atstarojumiem, nevis kā viens izteikts atstarojums. Minētais norāda uz to, ka ceturtais atstarojums ir saistīts ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām, nevis krasu to robežu.

Atzīmējams, ka intervālā no 1 m līdz 22 m atzīmei apskatītajam atstarojumam ir raksturīga zemāka amplitūda nekā pārējā radarogrammas daļā. Tas varētu būt skaidrojams ar to, ka intervālā no 1 m līdz 22 m atzīmei ir izsekojams arī piektais (5) atstarojums, kas ir atstarojis daļu no izstarotā ģeoradara signāla enerģijas. Kā rezultātā ģeoradara signālam, sasniedzot ar ceturto atstarojumu saistīto atstarotājpvirsmu radiolokācijas profila intervālā no 1 m līdz 22 m atzīmei, ir bijusi zemāka enerģija nekā pārējā radiolokācijas profila daļā. Ņemot vērā iepriekš minēto, jāsecina, ka aprakstītās ceturta atstarojuma amplitūdas izmaiņas nav saistītas ar robežu, kas izraisījusi šo atstarojumu, kontrastainības izmaiņām radiolokācijas profila garumā.

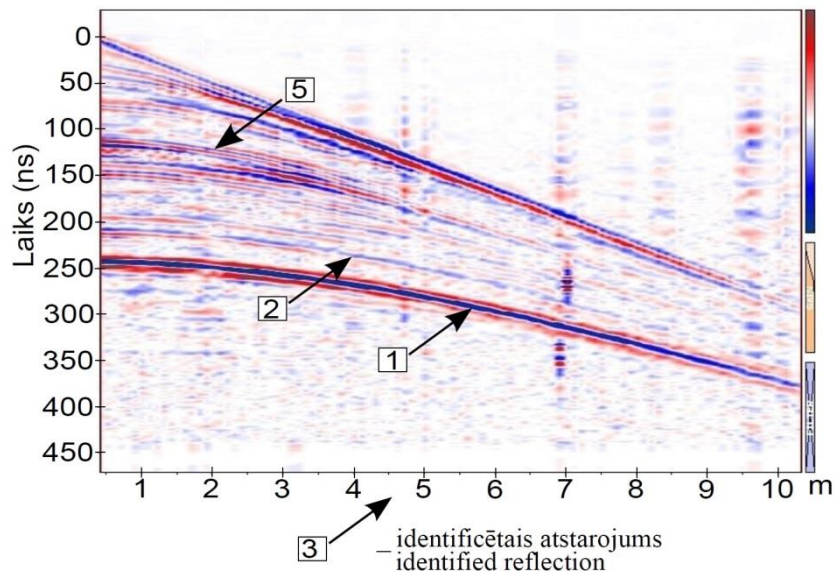
Tāpat ceturtajam atstarojumam raksturīgas lokālas amplitūdas variācijas, kas ir salīdzinoši lielas. Minēto variāciju lielums neļauj tās skaidrot tikai ar antenu sistēmas kontakta ar zemes virskārtu izmaiņām. Aprakstītās lokālās atstarojuma amplitūdas izmaiņas norāda, ka ceturtais atstarojums ir saistāms ar robežu starp diviem nogulumu slāņiem, kuru elektromagnētisko īpašību atšķirības visā profila garumā nav konstantas.

Piektais (5) atstarojums ir izsekojams līdz 21 m radarogrammas garuma atzīmei, kur tas vairs nav izšķirams no 4. atstarojuma (4.1. attēls). Ņemot vērā to, ka atstarojums izsekojams tikai daļā no radarogrammas, tas saistāms ar elektromagnētisko īpašību robežu, kas nav sastopama visā pētījumu teritorijā.

Aprakstītajam atstarojumam ir raksturīgas lielas amplitūdas svārstības visā radarogrammas daļā, kur tas izsekojams. Atsevišķās vietās (piemēram, pie 15 m atzīmes) identificēto atstarojumu veido salīdzinoši plata josla, kurā vērojami vairāki atstarojumi. Minētais būtiski ierobežo iespējas precīzi noteikt laiku, pēc kura piektais atstarojums ir saņemts. Piektā atstarojuma raksturojums norāda uz to, ka ar to saistītā elektromagnētisko īpašību robeža ir neizteikta, un atsevišķās radiolokācijas profila daļās atstarojums drīzāk ir saistāms ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām nevis krasu elektromagnētisko īpašību robežu.

Visā radarogrammas garumā aptuveni pie 60 ns laika atzīmes ir identificējami vairāki subhorizontāli atstarojumi (4.1. attēls). Minētie atstarojumi veido salīdzinoši platu (aptuveni trīs periodus platu) zonu, kas līdzīgi kā gadījumā ar piekto atstarojumu saistāma ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Apskatītā zona pētījuma gaitā tika identificēta kā 6. atstarojums. Intervālā no 7 m līdz 22 m atzīmei apskatītais atstarojums ir daudz izteiktāks nekā pārējā radarogrammas daļā. Tas visticamāk saistāms ar to, ka šajā radiolokācijas profila intervālā purva virskārta bija mitrāka nekā pārējā tā daļā (2.2. nodaļa).

Vadoties pēc pētījuma sākumā izstrādātās metodikas (2.3.9. nodaļa), CMP mērījumus tika izvēlēts veikt pie 12 m atzīmes (4.1. attēls). CMP mērījumu laikā kopumā tika ierakstīti 100 atsevišķi zondējumi, atvirzot raidītāj un uztvērēj antenas vienu no otras līdz 10,32 m attālumam (4.2. attēls).



4.2. attēls. Radarogramma Cena-1-cmp

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu kā raidītāju un 500 MHz antenu sistēmu kā uztvērēju.

Figure 4.2. Radar image Cena-1-cmp

Recorded with a 300 MHz antenna system as a transmitter and the 500 MHz antenna system as a receiver.

Radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā ir iespējams izsekot sešus subhorizontālus atstarojumus. Trīs no tiem (1., 2. un 5.) tika identificēti arī CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā (4.2. attēls).

Ņemot vērā to, ka radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā trešajam atstarojumam ir raksturīga salīdzinoši zema amplitūda (4.1. attēls), bija sagaidāms, ka minētais atstarojums netiks identificēts CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā. Savukārt 4. atstarojuma viennozīmīgu identificēšanu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā traucēja salīdzinoši daudzie atstarojumi, kas radarogrammā ir identificējami intervālā no 110 ns līdz 150 ns laika atzīmei (4.1. attēls). Līdzīgi kā gadījumā ar 3. atstarojumu, 6. atstarojums netika izsekots, jo CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tā amplitūda ir salīdzinoši maza, kas liedz atstarojuma viennozīmīgu identificēšanu.

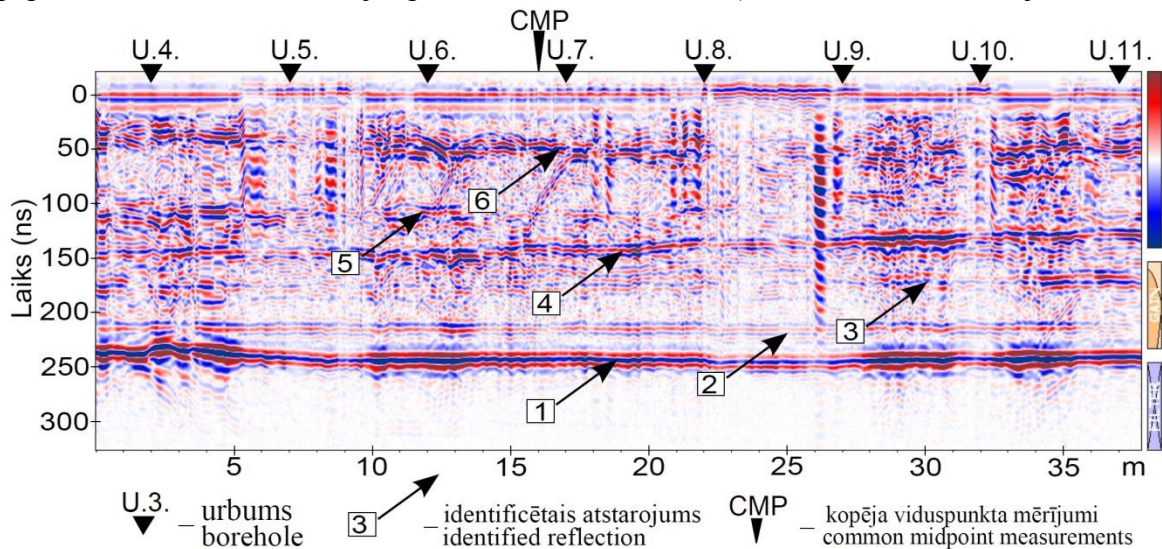
Pirmais (1.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz pat 95. zondējumam, kas atbilst 9,82 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atlikušajos 5 zondējumos 1. atstarojums saplūda ar neinformatīvajiem signāliem, kurus nebija iespējams dzēst radarogrammas apstrādes laikā.

Savukārt 2. atstarojumu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā bija iespējams izsekots līdz 66. zondējumam, kas atbilst 6,92 m attālumam starp ģeoradara antenām. Līdzīgi kā gadījumā ar 1. atstarojumu tālāku 2. atstarojuma izsekošanu traucēja neinformatīvie signāli.

Piektais (5.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots tikai līdz 38. zondējumam, kas atbilst 4,22 m attālumam starp ģeoradara antenām. Tālāk 5. atstarojumu nebija iespējams izsekot, jo tā amplitūda bija pārāk maza, lai to būtu iespējams viennozīmīgi identificēt.

Izmantojot iegūtos mērījumus, tika aprēķināts ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums un tam atbilstošā  $\epsilon$  līdz ar šiem atstarojumiem saistītajām atstarotājiervismām. Rezultātā pēc 2.3.7. nodaļā aprakstītās metodikas tika aprēķināts dziļums, no kura ir saņemti visi radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētie subhorizontālie atstarojumi (4.1. tabula).

Apskatot radarogrammu, kas tika ierakstīta, veicot radiolokācijas profilēšanu pa papildus ierīkoto radiolokācijas profilu Cena-u (4.3. attēls), tika konstatēts, ka tajā ir



4.3. attēls. Radarogramma Cena-u

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.3. Radar image Cena-u

Recorded with a 300 MHz antenna system.

iespējams identificēt sešus subhorizontālos atstarojumus, kas saistāmi ar tām pašām atstarotājpvirsmām, ar kurām saistāmi seši radarogrammā Cena-1 identificētie atstarojumi. Līdzīgi kā radarogrammā Cena-1, arī radarogrammā Cena-u ģeoradara signāla atstarojumi ir identificējami līdz pat 260 ns laika atzīmei.

Analizējot radarogrammu kopumā, tika konstatēts, ka purva virskārtas īpašības ir būtiski ietekmējušas iegūto mērījumu kvalitāti (2.2. nodaļa). Kā redzams ierakstītajā radarogrammā no 5 m līdz 10 m, kā arī no 22 m līdz 27 m atzīmes un pie 10. urbuma atrašanās vietas identificētajiem subhorizontālajiem atstarojumiem ir relatīvi zemāka amplitūda nekā radarogrammas pārējā daļā (4.3. attēls). Atzīmētajos intervālos uz radiolokācijas profila līnijas atradās zonas ar salīdzinoši sausāku purva virskārtu (pacēlumi jeb ciņi (4.4. attēls)). Turpretim radarogrammas daļās, kas atbilst vietām, kur radiolokācijas profils šķērsoja mitrākas purva virskārtas daļas, ir iespējams identificēt atstarojumus, kas saņemti no nogulumu slāņiem, kas ieguļ dziļāk par purva gultni (piemēram intervālā ap 4. urbuma atrašanās vietu).

Līdzīgi kā radarogrammā Cena-1, radarogrammā Cena-u salīdzinoši viegli visā radarogrammas garumā ir iespējams identificēt 1. ģeoradara signāla atstarojumu (4.3. attēls), kas, ņemot vērā uz radiolokācijas profila Cena-1 iegūtos datus, tika saistīts ar purva gultni. Atzīmējams, ka radarogrammā no 1 m līdz 5 m atzīmei 1. atstarojums ir saņemts pēc mazāka laika intervālā nekā pārējā radarogrammā, kas norāda uz to, ka šajā radiolokācijas profila daļā purva gultnē vērojams lokāls pacēlums.

#### 4.1. tabula. Ar radarogrammā Cena-1 identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\epsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotājpvirsmi (2.3.7. nodaļa).

Table 4.1. Results of calculations based on identified reflections of Cena-1 radar image  
Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\epsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.1.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ( $m s^{-1}$ )	Atbilstošā $\epsilon$	Atstarotājpvirsmas dziļums no zemes virsmas (m)		
			1. urbums	3. urbums	2. urbums
1.	35061375	73,11	4,57	4,45	4,38
2.	34205263	76,82	3,92	3,93	3,81
3.	-	-	3,30***	3,20***	3,30***
4.	-	-	2,74***	2,72***	2,39**
5.	34102786	77,28	2,22	2,34*	-
6.	-	-	0,95***	1,02***	0,79***

Otrais (2) atstarojums ir izsekojams visā radarogrammā, un intervālos, kur purva virskārta bija mitrāka radiolokācijas profilēšanas laikā, tas ir viennozīmīgi identificējams. Kopumā radiolokācijas profilēšanas laikā iegūtie dati liecina par to, ka ar 2. atstarojumu saistītā atstarotājpvirsmā ir laterāli izturēta visā pētījumu objektā (4.1. attēls un 4.3. attēls).

Radarogrammā Cena-1 intervālā no 15 m atzīmes līdz 41 m atzīmei apskatītais atstarojums sastāv vismaz no diviem periodiem, kas liecina par iespējamu 2. atstarojuma

saistību ar plāna (aptuveni septiņus līdz 30 cm bieža) nogulumu slāņa robežām. Visā radarogrammā Cena-u garumā 2. atstarojumu veido pusotrs signāla periods, kas norāda uz to, ka, ja 2. atstarojums ir saistāms ar plānu nogulumu slāni, tad tā biezums gar radiolokācijas profila Cena-u līniju ir mazāks par septiņiem centimetriem.



4.4. attēls. Radiolokācijas profilēšana pētījumu objektā Cena (A. Ņelājeva foto, 2014. gada aprīlis)

Apzīmējumi: Ar baltu pārtrauktu līniju iezīmēti ciņi.

Figure 4.4. Radiolocation profiling in the research area Cena (Photo by A. Ņelājevs, April of 2014)

Legend: White dashed line marks hummocks.

Trešā (3) atstarojuma izsekošana visā radarogrammas garumā ir apgrūtināta arī radarogrammā Cena-u (4.3. attēls). Tomēr atsevišķās radarogrammas vietās atstarojums ir viennozīmīgi identificējams (piemēram pie 30 m un 35 m atzīmes), kas ļāva noteikt laiku, pēc kura tas ir saņemts pie 11. Urbuma, ar augstu precizitāti.

Ceturtais (4) atstarojums ir izsekojams visā radarogrammas garumā (4.3. attēls). Līdzīgi kā radarogrammā Cena-1, kur 4. atstarojums ir identificējams kā zona ar vairākiem atstarojumiem nevis kā viens izteikts atstarojums, arī radarogrammas Cena-u lielākajā daļā 4. atstarojumu veido zona ar vairākiem atstarojumiem. Minētais liecina par to, ka 4. atstarojums ir saistīts ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām, nevis krasu to robežu.

Radarogrammā Cena-u intervālā, kurā ir izsekojams arī piektais (5) atstarojums, nav vērojama 4. atstarojuma amplitūdas pazemināšanās, kas tika identificēta, analizējot radarogrammu Cena-1. Visā radarogrammas garumā identificētā atstarojuma amplitūda ir salīdzinoši nemainīga. Protams, radarogrammas daļās, kas atbilst vietām, kur radiolokācijas profils šķērsoja mitrākas purva virskārtas daļas, 4. atstarojumam raksturīga lielāka amplitūda. Kopumā 4. atstarojumam nav raksturīgas lokālas amplitūdas svārstības, kas liecina par to, ka ar to saistītā atstarotā virsma ir laterālā virzienā izturēta.

Piektā (5.) atstarojuma izsekošana kopumā ir problemātiska (4.3. attēls). Intervālā līdz 22 m atzīmei apskatīto atstarojumu ir iespējams identificēt, taču atlikušajā radarogrammas daļā tā izsekošana ir neviennozīmīga. Tāpat atzīmējams, ka atšķirībā no radarogrammas Cena-1, kurā 5. atstarojums pie 21 m atzīmes saplūda ar 4. atstarojumu, radarogrammā Cena-u šāda atstarojumu saplūšana nav vērojama.

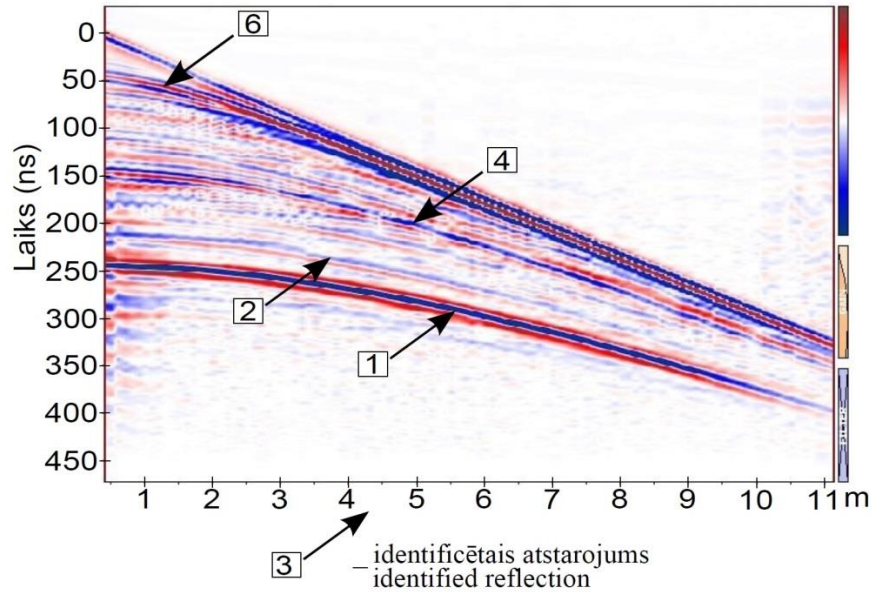
Līdzīgi kā radarogrammā Cena-1 aprakstītajam atstarojumam ir raksturīgas lielas amplitūdas svārstības visā radarogrammas daļā, kur tas izsekojams. Minētais būtiski ierobežo iespējas precīzi noteikt laiku, pēc kura 5. atstarojums ir saņemts. Piektā atstarojuma raksturojums norāda uz to, ka ar to saistītā elektromagnētisko īpašību robeža ir neizteikta.

Visā radarogrammas garumā aptuveni pie 50 ns laika atzīmes ir identificējami vairāki subhorizontāli atstarojumi (6. atstarojums) (4.3. attēls). Atšķirībā no

radarogrammas Cena-1, radarogrammā Cena-u identificētā atstarojumu zona ir daudz šaurāka un izteiktāka.

Intervālā no 6. urbuma līdz 7. urbumam aprakstītajā atstarojumu zonā vērojami arī vairāki atstarojumi, kas saistāmi ar lokāliem objektiem. Minētos atstarojumus visticamāk ir izraisījušas atsevišķas koku saknes.

Vadoties pēc pētījuma sākumā izstrādātās metodikas (2.3.9. nodaļa), CMP mērījumus tika izvēlēts veikt pie 16 m atzīmes (4.3. attēls). CMP mērījumu laikā tika konstatēts, ka ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi ir ar salīdzinoši lielu amplitūdu pat pie liela antenu savstarpējā attāluma (vairāk kā 9 m). Rezultātā raidītāj un uztvērēj antenas tika atvirzītas viena no otras līdz pat 11,02 m attālumam, kas atbilst 107 atsevišķiem zondējumiem (4.5. attēls).



4.5. attēls. Radarogramma Cena-u-cmp

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu kā raidītāju un 500 MHz antenu sistēmu kā uztvērēju.

Figure 4.5. Radar image Cena-u-cmp

Recorded with a 300 MHz antenna system as a transmitter and a 500 MHz antenna system as a receiver.

Līdzīgi kā radarogrammā Cena-1-cmp, arī radarogrammā Cena-u-cmp nebija iespējams identificēt visus subhorizontālos atstarojumus, kas tika izsekoti radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā. Kopumā CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika identificēti četri atstarojumi (1., 2., 4. un 6.). Iemesli, kāpēc netika identificēti pārējie atstarojumi, ir līdzīgi kā gadījumā, kad tika apskatīta radarogramma Cena-1-cmp.

Pirmais (1.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz pat 95. zondējumam, kas atbilst 9,82 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atlikušajos zondējumos 1. atstarojuma amplitūda bija pārāk maza, lai to būtu iespējams viennozīmīgi identificēt.

Otro (2.) atstarojumu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā bija iespējams izsekot līdz 71. zondējumam, kas atbilst 7,42 m attālumam starp ģeoradara antenām. Līdzīgi kā gadījumā ar 1. atstarojumu, tālāku 2. atstarojuma izsekošanu traucēja pārāk mazā atstarojuma amplitūda.

Salīdzinoši veiksmīgi CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā bija iespējams izsekot 4. atstarojumu. Tas tika identificēts līdz pat 104. zondējumam. Savukārt 6. atstarojums tika izsekots līdz 31. zondējumam. Tālāka 6. atstarojuma izsekošana nebija

iespējama, jo tas saplūda ar ģeoradara signālu, kas pārvietojas starp raidītāj un uztvērējantenu pa zemes virskārtu (Jol, 2009).

Tālāk, izmantojot iegūtos mērījumus, tika aprēķināts ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums un tam atbilstošā  $\epsilon$  līdz ar šiem atstarojumiem saistītajām atstarotājpvirsmām. Sekojoši pēc 2.3.7. nodaļā aprakstītās metodikas tika aprēķināts dziļums, no kura ir saņemti visi radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi (4.2. tabula un 4.3. tabula).

#### 4.2. tabula. Ar radarogrammā Cena-u identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti I

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\epsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotājpvirsmi (2.3.7. nodaļa).

Table 4.2. Results of calculations based on identified reflections of Cena-U radar image I  
Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\epsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.3.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ( $\text{m s}^{-1}$ )	Atbilstošā $\epsilon$	Atstarotājpvirsmas dziļums no zemes virsmas (m)			
			4. urbums	5. urbums	6. urbums	7. urbums
1.	35162480	72,69	4,23	4,40	4,42	4,42
2.	34510867	75,46	3,83	3,86	3,86	3,86
3.	-	-	3,20***	3,26**	-	-
4.	33719430	79,05	2,59*	2,60	2,64	2,57
5.	-	-	1,91***	2,02***	1,96**	1,99***
6.	33941125	78,02	0,79*	0,91*	1,03*	1,03*

#### 4.3. tabula. Ar radarogrammā Cena-u identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti II

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\epsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotāvirsmi (2.3.7. nodaļa).

Table 4.3. Results of calculations based on identified reflections of Cena-U radar image II  
Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\epsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.3.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ( $m s^{-1}$ )	Atbilstošā $\epsilon$	Atstarotāvirsmas dziļums no zemes virsmas (m)			
			8. urbums	9. urbums	10. urbums	11. urbums
1.	35162480	72,69	4,43	4,45	4,42	4,37
2.	34510867	75,46	3,85	3,86	3,86	3,85
3.	-	-	-	3,15***	3,10***	3,02**
4.	33719430	79,05	2,45	2,46	2,38	2,31
5.	-	-	1,96***	-	-	-
6.	33941125	78,02	1,07*	1,09*	1,06*	1,01*

#### 4.1.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija

Pētījuma gaitā uz radiolokācijas profila Cena-1 tika izvietoti trīs urbumi. Pirmajā urbumā (U. 1.) purva gultne tika sasniegta 4,52 m dziļumā, otrajā urbumā (U. 2.) 4,43 m dziļumā, savukārt trešajā urbumā (U. 3.) 4,50 m dziļumā (4.6. attēls un 4.7. attēls). Visos urbumos tika konstatēts, ka purva gultni veido vidējgraudaina smiltis.

Laboratoriski analizējot no ierīkotajiem urbumiem iegūtos kūdras paraugus, tika konstatēts, ka virs purva gultnes iegūļ aptuveni 1,7 m biezs zemā tipa kūdras slānis. Minēto slāni kopumā veido grīšļu kūdra, bet tā pamatni veido koku grīšļu kūdra. Slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 30% (4.6. attēls un 4.7. attēls).

Tālāk zemā tipa kūdras slāni pārsedz aptuveni 0,2 m biezs pārejas tipa kūdras slānis, ko veido galvenokārt zāļu, grīšļu un grīšļu hipnu kūdra. Aprakstītā slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 26%. Savukārt purva virsējo slāni līdz aptuveni 2,6 m dziļumam veido augstā tipa kūdras slānis. Augstā tipa kūdras slāni pamatā veido fuskuma sfagnu kūdra, taču ir sastopama arī spilvju sfagnu, magelānsfagnu un šaurlapu sfagnu kūdra. Slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 18% (4.6. attēls un 4.7. attēls).

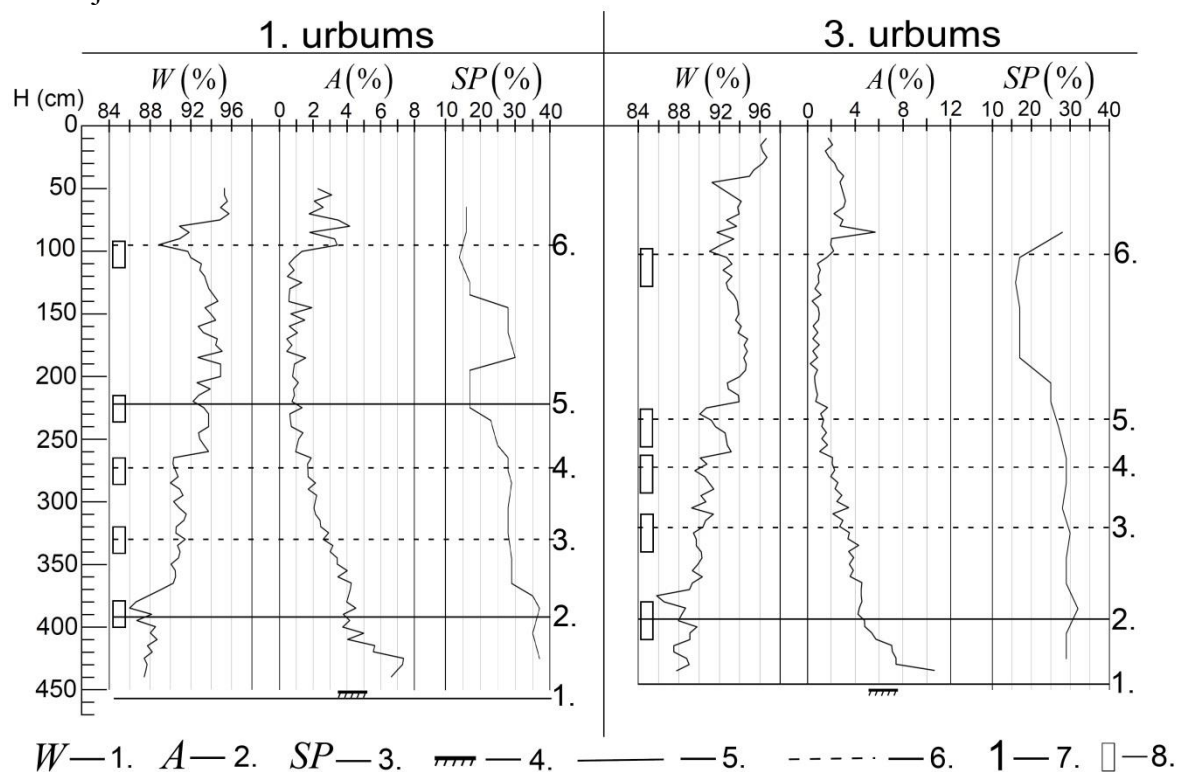
Kā redzams, dziļums, no kura saņemts 1. atstarojums, ne pie viena no ierīkotajiem urbumiem neatšķiras no dziļuma, kurā urbšanas laikā sasniegta purva gultne vairāk kā par pieciem centimetriem (4.6. attēls un 4.7. attēls). Pie tam, ņemot vērā, ka kūdrai un smiltīm ir izteikti atšķirīgas elektromagnētiskās īpašības, robeža starp šiem nogulumiem varētu izraisīt 1. atstarojuma raksturojumam atbilstošu ģeoradara signāla atstarojumu. Rezultātā 1. atstarojums tika saistīts ar purva gultni.

Tālāk aptuveni 3,8 m dziļumā pie visiem ierīkotajiem urbumiem vērojams intervāls, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni par 4% zemāks nekā tam pagulošajos



un uzgulošajos kūdras slāņos (4.6. attēls un 4.7. attēls). Savukārt radarogrammas Cena-1 analīzes laikā tika konstatēts, ka pie visiem no ierīkotajiem urbumiem 2. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas atbilst relatīvi sausākā intervāla apakšējai robežai (4.1. tabula). Minētais noteica to, ka 2. atstarojums tika saistīts ar minēto intervālu.

Ņemot vērā 2. atstarojuma raksturojumu, ir sagaidāms, ka ar to ir saistāmas krāsas elektromagnētisko īpašību izmaiņas. Uz radiolokācijas profila Cena-1 iegūtie mērījumi liecina par to, ka šādu salīdzinoši izteiktu ģeoradara signāla atstarojumu ir izraisījušas aptuveni 4% lielas mitruma daudzuma izmaiņas. Tāpat, identificēto atstarojumu, analīzes gaitā tika konstatēts, ka 2. atstarojums iespējams ir saistāms ar plāna nogulumu slāņa robežām, kura biezums nepārsniedz 30 cm. Ierīkotajos urbumos identificētā relatīvi sausākā intervāla biezums variē intervālā no 15 cm līdz 30 cm, kas apstiprina 2. atstarojuma saistību ar identificēto intervālu.



4.6. attēls. Kūdras īpašību izmaiņas Cenas tīrelis ģeoloģiskajā griezumā pie 1. un 3. urbuma Apzīmējumi: 1 – mitruma daudzums; 2 – pelnainība; 3 – kūdras sadalīšanās pakāpe; 4 – purva gultne; 5 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājrūpšanas dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 6 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājrūpšanas dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 7 – atstarojuma numurs; 8 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.6. Changes of peat properties in the geological section of Cenas tīrelis bog at borehole 1 and 3

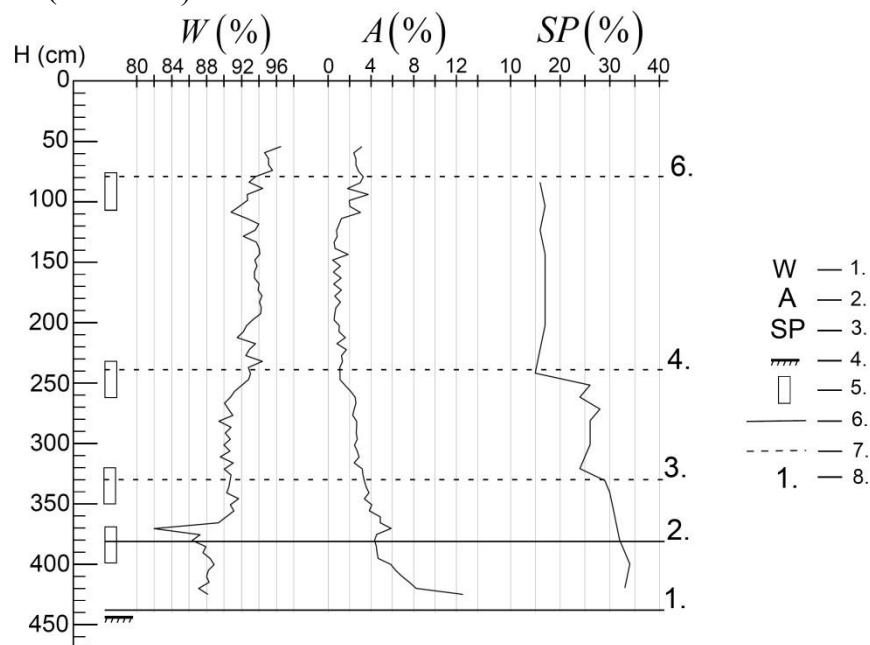
Legend: 1 – moisture content; 2 – ash content; 3 – degree of peat decomposition; 4 – mineral bed of the bog; 5 – reflection representing a reflecting surface with a precisely know depth; 6 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 7 – number of reflection; 8 – depth interval of reflection.

Dziļumā, no kura saņemts 3. atstarojums, ne pie viena no ierīkotajiem urbumiem nav vērojamas ne kūdras mitruma daudzuma, ne pelnainības izmaiņas (4.6. attēls un 4.7. attēls). Pie 2. urbuma dziļumā, no kura ir saņemts 3. atstarojums, ir vērojamas nelielas sadalīšanās pakāpes izmaiņas, taču, ņemot vērā to, ka pie pārējiem diviem urbumiem šādas izmaiņas netika konstatētas, 3. atstarojums nevar tikt skaidrots ar sadalīšanās pakāpes izmaiņām. Protams, 3. atstarojuma raksturojums norāda uz tā saistību ar salīdzinoši neizteiktu elektromagnētisko īpašību robežu, tomēr ir sagaidāms, ka ar apskatīto

atstarojumu saistītās kūdras īpašību izmaiņas būs salīdzinoši lielākas nekā kūdras īpašību izmaiņas intervālos, no kuriem nav saņemti ģeoradara signāla atstarojumi. Rezultātā 3. atstarojumu nav iespējams skaidrot ar izmaiņām noteiktajās kūdras īpašībās.

Pirmajā urbumā, 2,6 m dziļumā ir vērojama krasa mitruma daudzuma samazināšanās par 3,5%. Kamēr 4. atstarojums pie 1. urbuma tika saņemts no 2,74 m dziļuma (4.1. tabula). Līdzīgi kā pie 1. urbuma, arī pie 2. urbuma dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums, vērojamas mitruma daudzuma izmaiņas (4.6. attēls un 4.7. attēls). Tomēr tās nav tik krāsas kā pie 1. urbuma – 20 cm intervālā mitruma daudzums samazinās par 2,1%. Pie 3. urbuma 4. atstarojums tika saņemts no 2,72 m dziļuma, savukārt 2,6 m dziļuma vērojama mitruma daudzuma samazināšanās par 3%. Iepriekš minētais noteica to, ka 4. atstarojums tika sasaistīts ar aprakstītajām kūdras mitruma daudzuma izmaiņām Cenas tīreļa ģeoloģiskajā griezumā.

Ceturtnā (4.) atstarojuma raksturojums norāda uz to, ka tas ir saistāms ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā griezumā, kuru amplitūda laterālā virzienā ir mainīga. Ņemot vērā to, ka pie 2. urbuma identificētās mitruma daudzuma izmaiņas 2,6 m dziļumā ir pakāpeniskas, tas papildus liecina par 4. atstarojuma saistību ar tām (4.7. attēls).



4.7. attēls. Kūdras īpašību izmaiņas Cenas tīreļa ģeoloģiskajā griezumā pie 2. urbuma  
Apzīmējumi: 1 – mitruma daudzums; 2 – pelnainība; 3 – kūdras sadalīšanās pakāpe; 4 – purva gultne; 5 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums; 6 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājsvirsma dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 7 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājsvirsma dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 8 – atstarojuma numurs.

Figure 4.7. Changes of peat properties in the geological section of Cenas tīreļa bog at borehole 2

Legend: 1 – moisture content; 2 – ash content; 3 – degree of peat decomposition; 4 – mineral bed of the bog; 5 – depth interval of reflection; 6 – reflection representing a reflecting surface with a precisely known depth; 7 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 8 – number of reflection.

Atzīmējams, ka pie 2. urbuma dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums, tika identificētas ne tikai mitruma daudzuma izmaiņas, bet arī robeža starp kūdras slāņiem ar atšķirīgu sadalīšanās pakāpi. Tomēr, ņemot vērā to, ka pie 1. un 3. urbuma 4. atstarojums ir saņemts aptuveni par 50 cm dziļāk nekā minētā robeža starp kūdras slāņiem ar atšķirīgu sadalīšanās pakāpi (4.6. attēls un 4.7. attēls), apskatītais atstarojums domājams nav saistīts ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām.

Pie 1. urbuma 5. atstarojums ir saņemts no 2,22 m dziļuma (4.1. tabula). Savukārt 1. urbuma griezumā 2,30 m dziļumā tika identificētas sadalīšanās pakāpes izmaiņas, kas norāda uz iespējamu saistību starp iegūto atstarojumu un sadalīšanās pakāpes izmaiņām. Tomēr pie 3. urbuma 5. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas ir par 30 cm lielāks nekā dziļums, kurā vērojamas sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.6. attēls), kas, ņemot vērā aprēķināto dziļuma intervālu, no kura atstarojums saņemts, uzskatāma par pārāk lielu atšķirību. Rezultātā iegūto radiolokācijas mērījumu interpretācijas gaitā tika izslēgta 5. atstarojuma saistība ar sadalīšanās pakāpes izmaiņām.

Atzīmējams, ka pie 3. urbuma 2,30 m dziļumā vērojamas salīdzinoši krāsas mitruma daudzuma izmaiņas par 2,5%, kas atbilst dziļumam, no kura ir saņemts 5. atstarojums. Taču pie 1. urbuma šādas izmaiņas dziļumā, no kura saņemts 5. atstarojums, netika konstatētas.

Ņemot vērā to, ka 5. atstarojuma raksturojums norāda uz to, ka ar to saistītā robeža var būt atsevišķās vietās neizteikta, nevar izslēgt, ka 5. atstarojums ir saistāms ar nelielām, atsevišķās vietās neizteiktām mitruma daudzuma izmaiņām pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā.

Sestais (6.) atstarojums pie visiem uz radiolokācijas profila Cena-1 ierīkotajiem urbumiem ir ticis saņemts no aptuveni viena metra dziļuma (4.6. attēls un 4.7. attēls). Pie 2. urbuma šajā dziļumā netika identificētas izmaiņas kūdras īpašībās, kas tika noteiktas. Savukārt pie 1. urbuma dziļumā, no kura saņemts 6. atstarojums, ir vērojams intervāls, kam raksturīgs salīdzinoši zemāks mitruma daudzums (par 3,5% mazāks), kā arī nedaudz palielināta pelnainība. Pie 3. urbuma minēto īpašību izmaiņas ir daudz neizteiktākas, savukārt atbilstošajā dziļumā vērojamas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas. Ņemot vērā to, ka dziļumā, no kura saņemts 6. atstarojums, vērojams nogulumu īpašību izmaiņas nav identificējamas visos ierīkotajos urbumos, nav iespējama to viennozīmīga sasaistīšana ar apskatīto atstarojumu. Tāpat atzīmējams, ka mitruma daudzuma izmaiņas dziļumā, no kura saņemts 6. atstarojums, nav noteiktas ar augstu precizitāti (2.4.3. nodaļa), kas liedz korektu mitruma daudzuma izmaiņu sasaisti ar apskatīto atstarojumu novērtējumu.

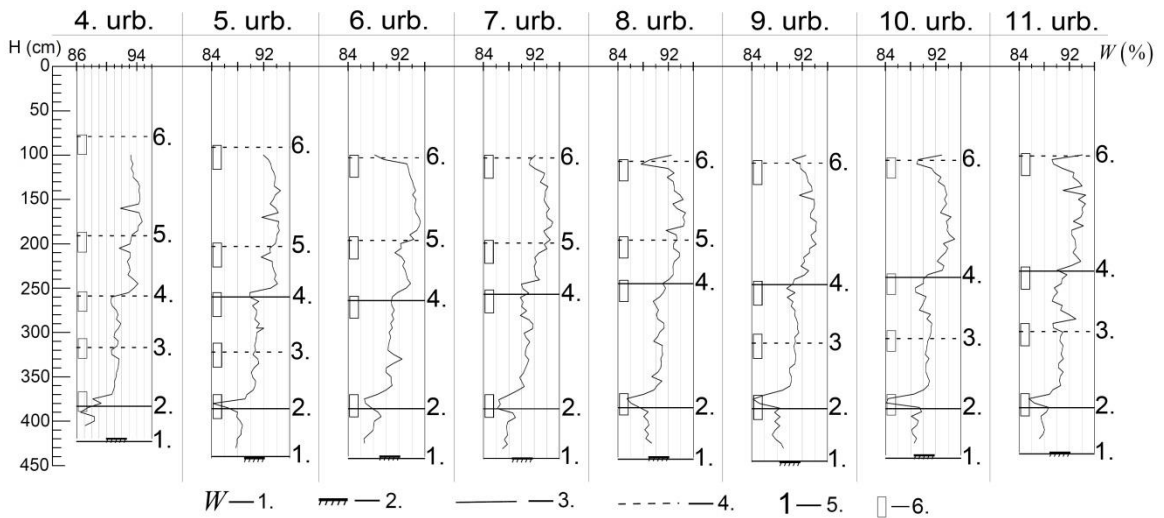
Cenas tīrelī iegūto radiolokācijas mērījumu interpretācijas gaitā nebija iespējama viennozīmīga 3., 5. un 6. atstarojuma sasaiste ar nevienu no apskatīto kūdras īpašību izmaiņām. Tomēr veiktie mērījumi liecināja par iespējamu 5. un 6. atstarojuma saistību ar mitruma daudzuma izmaiņām pētītajā griezumā. Tāpat veiktie mērījumi neļauj viennozīmīgi noteikt, vai 4. atstarojums nav saistīts ne tikai ar mitruma daudzuma, bet arī kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām.

Iepriekš minētais noteica to, ka, lai būtu iespējams detalizēti noteikt mitruma daudzuma izmaiņas pētītajā griezumā un to iespējamu saistību ar identificētajiem atstarojumiem, pētījuma gaitā Cenas tīreli tika ierīkoti papildus radiolokācijas profils tiešā radiolokācijas profila Cena-1 tuvumā (4.1. nodaļa).

Uz papildus ierīkotā radiolokācijas profila Cena-u tika izvietoti astoņi urbumi. Līdzīgi kā urbumos, kas tika ierīkoti uz radiolokācijas profila Cena-1, visos astoņos urbumos tika konstatēts, ka purva gultni veido rupjgraudaina smilts. Ņemot vērā to, ka radarogrammā Cena-u identificētais 1. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas atšķiras no urbumos identificētā purva gultnes dziļuma ne vairāk kā par trīs centimetriem, tas tika sasaistīts ar purva gultni (4.8. attēls).

Analizējot uz radiolokācijas profila Cena-1 iegūtos rezultātus, 2. atstarojums tika sasaistīts ar griezumuma intervālu, kurā kūdras mitruma daudzums ir aptuveni par 4% zemāks nekā tam pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos. Uz radiolokācijas profila Cena-u iegūtie mērījumi apstiprina 2. atstarojuma saistību ar identificēto intervālu, jo pie visiem ierīkotajiem urbumiem dziļumā, no kura ir saņemts 2. atstarojums, tika identificēti relatīvi

sausāks kūdras intervāls (izdalītā intervāla mitruma daudzums vidēji ir par 3,2% mazāks nekā to ietverošajos slāņos) (4.8. attēls).0



4.8. attēls. Kūdras mitruma daudzuma izmaiņas Cenas tīrelja ģeoloģiskajā griezumā gar radiolokācijas profilu Cena-u

Apzīmējumi: 1 – mitruma daudzums; 2 – purva gultne; 3 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotārvirsmas dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 4 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotārvirsmas dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 5 – atstarojuma numurs; 6 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.8. Changes of peat moisture content in the geological section of Cenas tīrelis bog along GPR profile Cena-u

Legend: 1 – moisture content; 2 – mineral bed of the bog; 3 – reflection representing a reflecting surface with a precisely know depth; 4 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 5 – number of reflection; 6 – depth interval of reflection.

Radarogrammā Cena-u identificētā 2. atstarojuma raksturojums liecina par to, ka, ja apskatītais atstarojums ir saistīts ar plānu nogulumu slāni, tad šī slāņa biezums nav būtiski lielāks par septiņiem centimetriem. Taču uz radiolokācijas profila Cena-u ierīkotajos urbumos identificētais relatīvi sausākais kūdras intervāls ir aptuveni 15 līdz 20 cm biezs (4.8. attēls). Minētais norāda uz to, ka 2. atstarojums drīzāk ir saistīts ar vienu no izdalītā intervāla robežām nevis sastāv no diviem atsevišķiem atstarojumiem, kas saistāmi ar šī intervāla robežām.

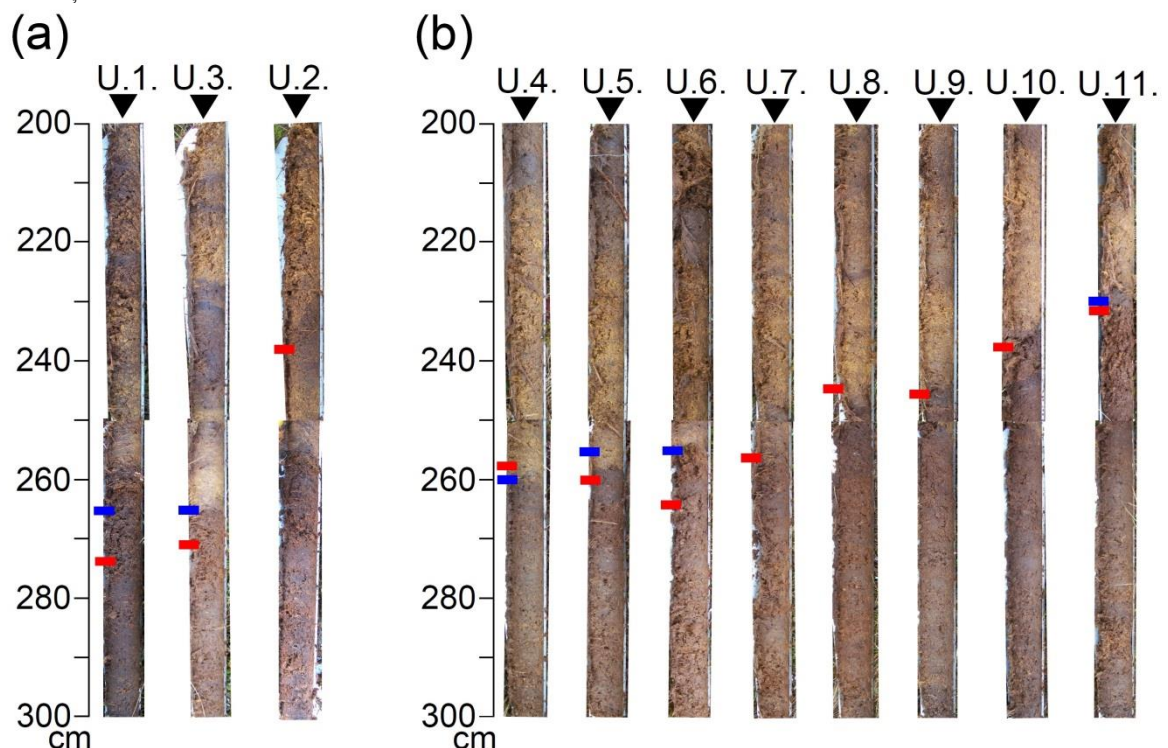
Uz radiolokācijas profila Cena-u dziļumā, no kura saņemts 3. atstarojums, nav vērojamas mitruma daudzuma izmaiņas. Izņēmums ir 11. urbums, pie kura atbilstošajā dziļumā ir vērojamas mitruma daudzuma izmaiņas (4.8. attēls). Tomēr domājams, ka identificētajām izmaiņām ir lokāls raksturs. Tādējādi uz radiolokācijas profila Cena-u iegūtie rezultāti apstiprina to, ka 3. atstarojumu nav iespējams skaidrot ar izmaiņām noteiktajās kūdras īpašībās.

Līdzīgi kā uz Cenas tīrelī sākotnēji ierīkotā radiolokācijas profila, arī uz radiolokācijas profila Cena-u iegūtie rezultāti liecina par 4. atstarojuma saistību ar kūdras mitruma daudzuma izmaiņām (4.8. attēls). Dziļumā, no kura ir saņemts 4. atstarojums (4.2. tabula un 4.3. tabula), pie visiem ierīkotajiem urbumiem tika identificētas mitruma daudzuma izmaiņas par aptuveni 3,5%. Tāpat pie vairākiem no ierīkotajiem urbumiem (8., 9. un 10. urbuma) identificētās mitruma daudzuma izmaiņas ir pakāpeniskas, kas, ņemot vērā 4. atstarojuma raksturojumu, papildus apstiprina 4. atstarojuma saistību ar aprakstītajām izmaiņām.

Tomēr atzīmējams, ka dziļumā, no kura ir saņemts 4. atstarojums, ir vērojamas ne tikai mitruma daudzuma izmaiņas, bet arī robeža starp gaišu, mazsadalījušos kūdru un tumšu, labi sadalījušos kūdru (4.9. attēls b). Izmantojot kūdras paraugu, kas tika iegūti pie

1., 2. un 3. urbuma (4.6. attēls un 4.7. attēls), sadalīšanās pakāpes analīžu rezultātus, tika noteikts, ka apskatītā robeža nošķir kūdras slāņus, kuru sadalīšanās pakāpe atšķiras aptuveni par 10%.

Kopumā no 11 Cenas tīrelī ierīkotajiem urbumiem tikai pie diviem no tiem dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums, netika identificētas būtiskas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.9. attēls). Taču, apskatot iegūto urbumu seržu fotogrāfijas, ir redzams, ka pie 1. un 3. urbuma aptuveni 2,4 m dziļumā ir vērojamas, domājams, lokālas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.9. attēls a), kas sarežģīja apskatītās sadalīšanās pakāpes robežas identificēšanu. Minētais norāda uz to, ka pie visiem no ierīkotajiem urbumiem, dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums, ir vērojamas gan mitruma daudzuma, gan sadalīšanās pakāpes izmaiņas. Rezultātā nav iespējams viennozīmīgi nošķirt, vai 4. atstarojumu ir izraisījušas mitruma daudzuma, sadalīšanās pakāpes vai abu īpašību izmaiņas.



4.9. attēls. Pētītais kūdras nogulumu griezumā. a) Radiolokācijas profila Cena-1 verificācijai izveidoto urbumu kūdras seržu fotogrāfijas. b) Radiolokācijas profila Cena-u verificācijai izveidoto urbumu kūdras seržu fotogrāfijas

Apzīmējumi: ar sarkanām līnijām ir atzīmēts dziļums, no kura ir saņemts 4. atstarojums, savukārt ar zilām līnijām ir atzīmēts dziļums, kurā vērojamas krāsas mitruma daudzuma izmaiņas.

Figure 4.9. Studied geological section of peat deposits. a) Pictures of peat cores obtained from installed boreholes for verification of GPR profile Cena-1. b) Pictures of peat cores obtained from installed boreholes for verification of GPR profile Cena-u

Legend: Red markers represent depth of reflection #4; blue – abrupt changes of moisture content.

Uz abiem Cenas tīrelī ierīkotajiem radiolokācijas profiliem ierakstīto radarogrammu analīzes laikā tika konstatēts, ka ar 5. atstarojumu saistītā elektromagnētisko īpašību robeža ir neizteikta. No 3. urbuma iegūto paraugu analīžu rezultāti norāda uz 5. atstarojuma iespējamu saistību ar kūdras mitruma daudzuma izmaiņām (4.6. attēls), taču nevienā no uz radiolokācijas profila Cena-u ierīkotajiem urbumiem dziļumā, no kura ir saņemts 5. atstarojums, mitruma daudzuma izmaiņas netika konstatētas (4.8. attēls). Sekojoši līdzīgi kā gadījumā ar 3. atstarojumu iegūtie rezultāti

apstiprina to, ka 5. atstarojumu nav iespējams skaidrot ar izmaiņām noteiktajās kūdras īpašībās.

Radarogrammā Cena-u identificētais 6. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kurā pie četriem no ierīkotajiem urbumiem (6., 8., 10. un 11. urbuma) ir vērojamas krasas mitruma daudzuma izmaiņas (4.8. attēls). Līdzīgi 6. atstarojumu ir iespējams sasaistīt ar mitruma daudzuma izmaiņām arī pie 1. urbuma (4.6. attēls). Minētais liecina par to, ka 6. atstarojums ir saistīts ar laterālā virzienā mainīgām, taču izturētām mitruma daudzuma izmaiņām pētītajā griezumā.

## **4.2. Dzelves purvs**

Pētījumu objektā „Dzelve-1” tika ierīkots 49,3 m garš radiolokācijas profils (3.2. nodaļa; 4.10. attēls). Lai būtu iespējams precizēt pētījumu objekta ģeoloģisko griezumu un veikt identificēto radiolokācijas signāla atstarojumu interpretāciju, tieši uz radiolokācijas profila līnijas tika ierīkoti divi urbumi (4.10. attēls). Gan radiolokācijas mērījumi, gan ģeoloģiskie pētījumi tika veikti 2013. gada jūlijā.

Atzīmējams, ka iegūto datu analīzes gaitā tika aprēķināts, ka ar vienu no identificētajiem subhorizontālajiem atstarojumiem saistītā atstarotārvirisma iegul dziļāk par purva gultni (4.2.1. nodaļa un 4.2.2. nodaļa). Lai būtu iespējams veikt pilnīgu identificēto atstarojumu sasaisti ar nogulumu slāņu robežām, pētījumu objektā 2013. gada augustā 10 m no radiolokācijas profila sākuma tika ierīkots papildus ģeoloģiskais urbums. Urbšanas laikā tika izmantotas apvalkcaurules, kas ļāva veiksmīgi turpināt urbšanu arī dziļāk par purva gultni.

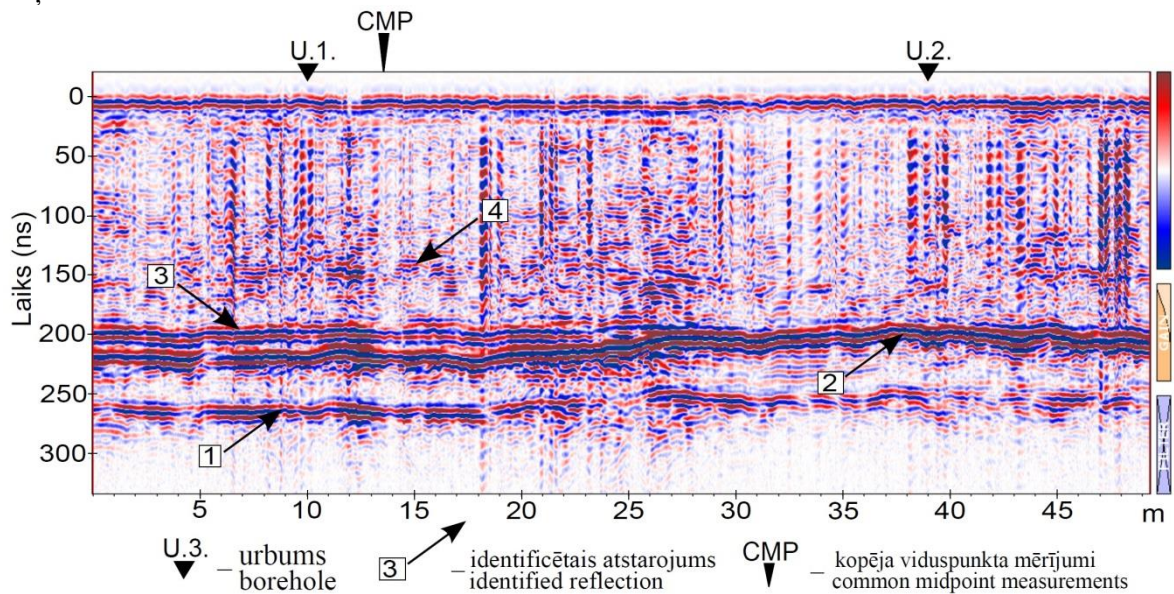
### **4.2.1. Radiolokācijas mērījumi**

Radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā ģeoradara signāla atstarojumi ir identificējami līdz pat 280 ns laika atzīmei (4.10. attēls). Šajā intervālā ir iespējams identificēt trīs izteiktus subhorizontālus atstarojumus, kā arī vienu subhorizontālu atstarojumu, kura izsekošana ir problemātiska. Iegūto radiolokācijas mērījumu analīzes gaitā uzmanība galvenokārt tika pievērsta minētajiem subhorizontālajiem atstarojumiem.

Visā radarogrammas garumā viennozīmīgi ir iespējams identificēt 1. ģeoradara signāla atstarojumu (4.10. attēls). Identificētais atstarojums ir saņemts pēc salīdzinoši liela laika intervāla, tomēr tam ir salīdzinoši liela amplitūda, kas norāda uz to, ka tas ir saistīts ar izteiktām nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Atzīmējams, ka atsevišķos radarogrammas intervālos (piemēram intervālā no 20 m līdz 26 m un no 40 m līdz 45 m) 1. atstarojums nav izteikts (4.10. attēls), kas norāda uz pakāpenisku elektromagnētisko īpašību maiņu pētījumu objekta griezumā. Ņemot vērā aprakstītā atstarojuma īpašības, tas pētījuma sākumposmā tika saistīts ar purva gultni.

Otro (2) atstarojumu veido skaidri identificējams pusotru periodu garš signāls, un to ir iespējams izsekot visā radarogrammā (4.10. attēls). Minētais norādu uz to, ka nogulumiem, kas paguļ atstarotārvirsmā, kas saistīta ar šo atstarojumu, ir mazāks gaismas laušanas koeficients nekā uzguļošajam nogulumiem. Otrā atstarojuma salīdzinoši lielā amplitūda liecina par to, ka atstarojums ir saistīts ar robežu, kas nošķir nogulumu slāņus ar izteikti atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām. Līdzīgi kā gadījumā ar 1. atstarojumu, arī 2. atstarojums intervālā no 20 m līdz 26 m ir identificējams kā atstarojumu zona, nevis viens pusotru periodu garš atstarojums (4.10. attēls). Tomēr arī šajā radarogrammas

intervālā ir iespējams identificēt pusotru periodu garu atstarojumu, izdalītās zonas augšējā daļā.



4.10. attēls. Radarogramma Dzelve-1

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.10. Radar image Dzelve-1

Recorded with a 300 MHz antenna system.

Trešais (3.) atstarojums ir izsekojams līdz 25 m radarogrammas garuma atzīmei, kur tas saplūst ar 2. atstarojumu (4.10. attēls). Trešā atstarojuma salīdzinoši lielā amplitūda liecina par to, ka atstarojums ir saistīts ar robežu, kas nošķir kūdras slāņus ar izteikti atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām.

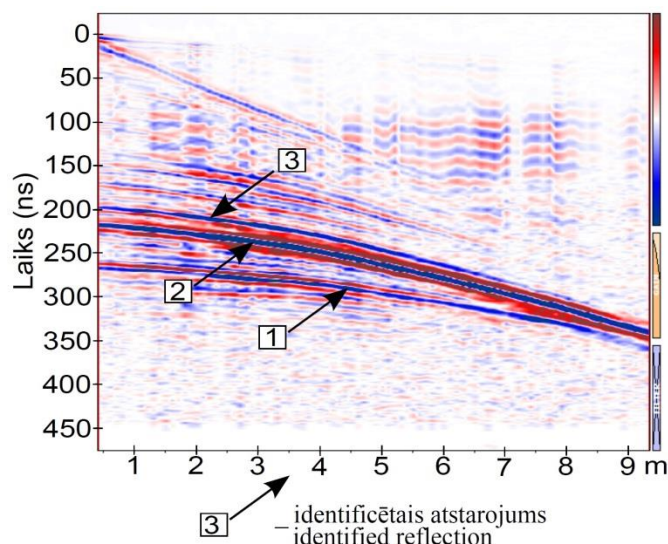
Visā radarogrammas garumā aptuveni pie 150 ns laika atzīmes atsevišķos radarogrammas posmos ir identificējams atstarojums (4. atstarojums) ar salīdzinoši mazu amplitūdu (4.10. attēls). Vairākos radarogrammas posmos atstarojuma mazā amplitūda liedz tā izšķiršanu no atsevišķiem lokāliem atstarojumiem, ka saistāmi ar lokālām nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Minētais norāda uz atstarojuma saistību ar nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā.

Vadoties pēc pētījuma sākumā izstrādātās metodikas (2.3.9. nodaļa), CMP mērījumus tika izvēlēts veikt pie 13,5 m atzīmes (4.10. attēls). CMP mērījumu laikā kopumā tika ierakstīti 90 atsevišķi zondējumi, atvirzot raidītāj un uztvērēj antenas vienu no otras līdz 9,32 m attālumam (4.11. attēls). Antenas netika atvirzītas tālāk, jo tika sasniegtas robežas laukumam, kas atbilda pētījuma sākumā noteiktajām prasībām, kam jāatbilst vietai, kurā tiek veikti CMP mērījumi (2.3.9. nodaļa).

CMP mērījuma laikā ierakstītajā radarogrammā ir iespējams identificēt trīs no četriem radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā izsekotajiem atstarojumiem (4.4. tabula).

Pirmais (1.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz 61 zondējumam, kas atbilst 6,42 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atlikušajos zondējumos 1. atstarojums saplūda ar 2. atstarojumu, kā rezultātā tā identificēšana nebija iespējama.

Otro (2.) atstarojumu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā bija iespējams izsekot līdz 83. zondējumam, kas atbilst 8,62 m attālumam starp ģeoradara antenām. Tālāk 2. atstarojumu nebija iespējams izsekot, jo tā amplitūda bija pārāk maza, lai to būtu iespējams viennozīmīgi identificēt.



4.11. attēls. Radarogramma Dzelve-1-cmp

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu kā raidītāju un 500 MHz antenu sistēmu kā uztvērēju.

Figure 4.11. Radar image Dzelve-1-cmp

Recorded with a 300 MHz antenna system as a transmitter and a 500 MHz antenna system as a receiver.

4.4. tabula. Ar radarogrammā Dzelve-1 identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\epsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotājvirsmi (2.3.7. nodaļa).

Table 4.4. Results of calculations based on identified reflections of Dzelve-1 radar image  
Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\epsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.10.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ( $m s^{-1}$ )	Atbilstošā $\epsilon$	Atstarotājvirsmas dziļums no zemes virsmas (m)	
			1. urbums	2. urbums
1.	39187512	58,53	5,23	5,20
2.	34834947	74,06	3,85	3,47
3.	34224916	76,73	3,40	-
4.	-	-	2,51***	2,74***

Trešais (3.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz 53. zondējumam, kas atbilst 5,62 m attālumam starp ģeoradara antenām. Tālāk 3. atstarojumu nebija iespējams izsekot, jo tā amplitūda bija pārāk maza, lai to būtu iespējams viennozīmīgi identificēt.

CMP mērījumu gaitā ierakstītajā radarogrammā tikai atsevišķos zondējumos bija iespējams identificēt 4. atstarojumu, kā rezultātā tā viennozīmīga izsekošana nebija iespējama.

Iegūtie mērījumi tika izmantoti, lai aprēķinātu ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu un tam atbilstošā  $\epsilon$  līdz ar šiem atstarojumiem saistītajām atstarotājvirsmām. Sekojoši pēc 2.3.7. nodaļā aprakstītās metodikas tika aprēķināts dziļums, no kura ir

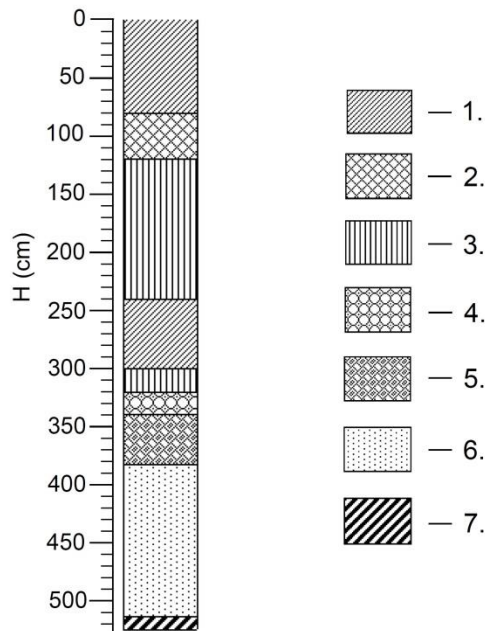


saņemti visi radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi (4.4. tabula).

#### 4.2.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija

Pētījuma gaitā uz radiolokācijas profila Dzelve-1 tika izvietoti divi urbumi. Pirmajā urbumā (U. 1.) purva gultne tika sasniegta 3,82 m dziļumā, savukārt otrajā urbumā (U. 2.) 3,5 m dziļumā (4.12. attēls). Abos ierīkotajos urbumos tika konstatēts, ka purva gultni veido rupjgraudaina smilts.

Laboratoriski analizējot no ierīkotajiem urbumiem iegūtos kūdras paraugus, tika konstatēts, ka visu purva griezumu veido augstā tipa kūdra (4.12. attēls). Pie 1. urbuma purva pamatnē ieguļ aptuveni 30 cm biezs spilvju kūdras slānis, kam raksturīgā sadalīšanās pakāpe ir 40%. Pētījuma gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka minētais slānis nav izturēts visā radiolokācijas profila garumā. Kopumā augstā tipa kūdru galvenokārt veido fuskuma sfagnu un šeihcēriju sfagnu kūdra, kurai raksturīgā sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 19%, taču intervālā no 2,5 līdz trīs metru dziļumam vērojams spilvju sfagnu kūdras slānis ar augstāku sadalīšanās pakāpi (27%).



4.12. attēls. Dzelves purva ģeoloģiskais griezum pie 1. urbuma

Apzīmējumi: Augstā tipa kūdra: 1 – spilvju-sfagnu; 2 – šeihcēriju-sfagnu; 3 – fuskuma sfagnu; 4 – magelānsfagnu; 5 – spilvju. Minerālgrunts: 6 – smilts rupjgraudaina; 7 – aleirīts mālais.

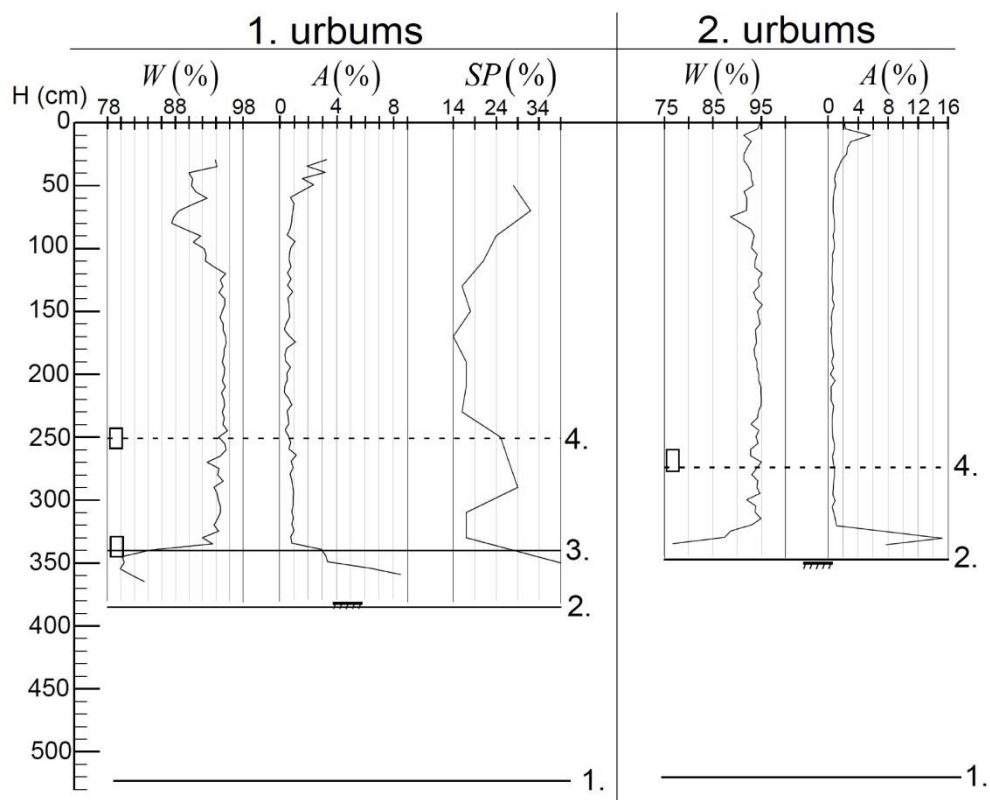
Figure 4.12. Geological section of Dzelve bog at borehole 1

Legend: Raised bog peat: 1 – cotton grass-Sphagnum; 2 – Scheuchzeria-Sphagnum; 3 – S. fuscum; 4 – S. magellanicum; 5 – cotton grass. Mineralsoil: 6 – sand coarse grained; 7 – silt clayish.

Ņemot vērā to, ka dziļums, no kura ir saņemts 2. atstarojums, pie abiem urbumiem neatšķiras no dziļuma, kurā sasniegta purva gultne vairāk kā par trīs centimetriem, 2. atstarojums tika sasaistīts ar purva gultni (4.13. attēls). Tāpat 2. atstarojuma raksturojums norāda uz tā saistību ar izteiktu elektromagnētisko īpašību robežu (4.2.1. nodaļa), kas papildus liecina par tā saistību ar purva gultni.

Tālāk aptuveni 3,4 m dziļumā pie 1. urbuma vērojama krasa mitruma daudzuma samazināšanās vairāk kā par 10% (4.13. attēls). Līdzīgi šajā dziļumā vērojama arī salīdzinoši liela kūdras sadalīšanās pakāpes palielināšanās un kūdras pelnu satura

palielināšanās. Sekojoši 1. urbuma griezumā ir iespējams izdalīt salīdzinoši plānu kūdras slāni, kam raksturīgais mitruma daudzums ir aptuveni 80% un raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 40%. Ņemot vērā to, ka 3. atstarojums pie 1. urbuma ir saņemts no 3,40 m dziļuma (4.4. tabula), tas tika saistīts ar izdalītā kūdras slāņa augšējo robežu. Atzīmējams, ka pie 2. urbuma minētais kūdras slānis netika konstatēts, kas papildus liecina par 3. atstarojuma saistību ar to, jo 3. atstarojumus tika identificēts tikai daļā no ierakstītās radarogrammas (4.10. attēls).



$W$ —1.  $A$ —2.  $SP$ —3.  $\text{////}$ —4.  $\text{—}$ —5.  $\text{-----}$ —6.  $\text{1}$ —7.  $\square$ —8.

4.13. attēls. Kūdras īpašību izmaiņas Dzelves purva ģeoloģiskajā griezumā pie 1. un 2. urbuma

Apzīmējumi: 1 – mitruma daudzums; 2 – pelnainība; 3 – kūdras sadalīšanās pakāpe; 4 – purva gultne; 5 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājpvirsmas dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 6 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājpvirsmas dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 7 – atstarojuma numurs; 8 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.13. Changes of peat properties in geological section of Dzelves bog at boreholes 1 and 2

Legend: 1 – moisture content; 2 – ash content; 3 – degree of peat decomposition; 4 – mineral bed of the bog; 5 – reflection representing a reflecting surface with a precisely know depth; 6 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 7 – number of reflection; 8 – depth interval of reflection.

Dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums pie 1. urbuma, vērojams intervāls, kam raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni par 10% lielāka nekā pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos (4.13. attēls). Rezultātā 4. atstarojums tika saistīts ar konstatētajām kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā.

Tomēr dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums pie 1. urbuma, ir iespējams identificēt arī nelielu mitruma daudzuma samazināšanos par 2%. Līdzīgi pie 2. urbuma dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums, vērojamas nelielas mitruma daudzuma svārstības.

Ceturajā (4.) atstarojuma raksturojums norāda uz tā saistību ar nelielām, laterālā virzienā mainīgām elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Sekojoši 4. atstarojums varētu būt saistīts arī ar identificētajām nelielajām mitruma daudzuma izmaiņām.

Iegūto datu analīzes gaitā tika aprēķināts, ka 1. atstarojums ir saistāms ar atstarotārvirsmu, kas ieguļ dziļāk par purva gultni (4.13. attēls un 4.4. tabula). Minētais noteica to, ka pētījumu objektā tika veikta atkārtota urbšana. Urbšanas laikā pie 1. urbuma 5,13 m dziļumā tika identificēts nogulumu slānis, kuru veidoja mālains aleirītis pelēkā krāsā ar nelielu grants graudu piejaukumu (4.12. attēls). Ņemot vērā to, ka pie 1. urbuma 1. atstarojums tika saņemts no 5,23 m dziļuma (4.4. tabula), tas tika saistīts ar 1. urbumā 5,13 m dziļumā identificēto robežu starp rupjgraudainas smilts slāni un mālaina aleirīta slāni.

### **4.3. Makinu purvs**

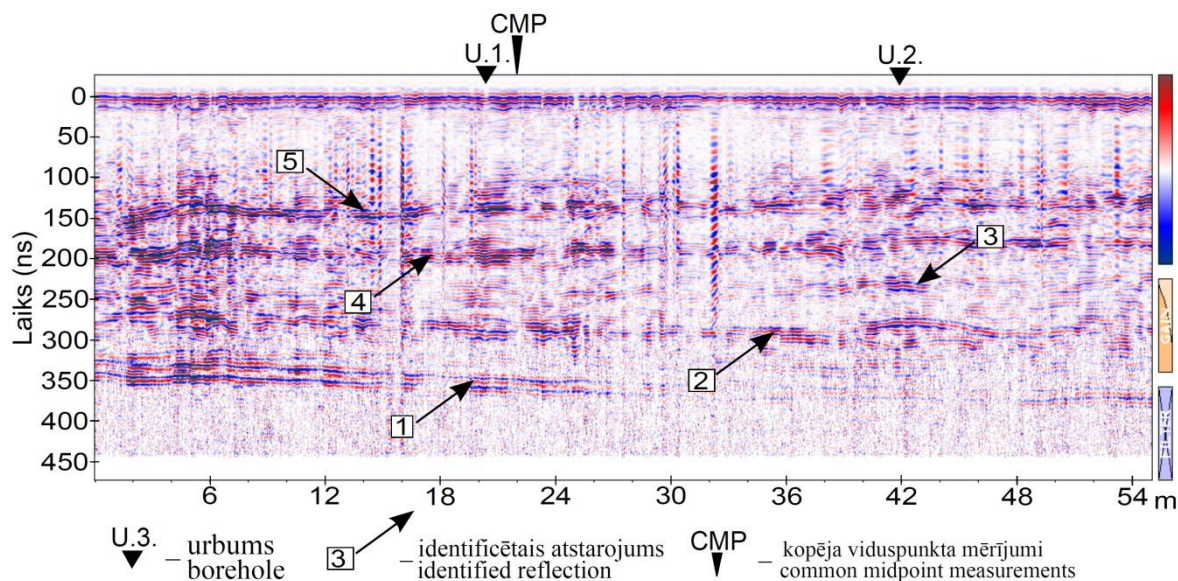
Pētījumu objektā „Makinu-1” tika ierīkots 55 m garš radiolokācijas profils (3.3. nodaļa; 4.14. attēls). Lai būtu iespējams sasaistīt identificētos radiolokācijas signāla atstarojumus ar kūdras fizikālo īpašību izmaiņām pētījumu objekta ģeoloģiskajā griezumā, tieši uz radiolokācijas profila līnijas tika ierīkoti divi urbumi (4.14. attēls). Gan radiolokācijas mērījumi, gan ģeoloģiskie pētījumi tika veikti 2013. gada oktobrī.

Analizējot sākotnēji iegūtos radiolokācijas mērījumus, tika konstatēts, ka radarogrammā, kas ierakstīta CMP mērījumu laikā, nav iespējams identificēt un izsekot lielāko daļu no atstarojumiem, kas tika identificēti radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā. Sekojoši 2013. gada novembrī CMP mērījumi tika veikti atkārtoti, izmantojot 100 MHz antenu sistēmu (2.3.9. nodaļa).

#### **4.3.1. Radiolokācijas mērījumi**

Radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā ģeoradara signāla atstarojumi ir identificējami līdz pat 380 ns laika atzīmei (4.14. attēls). Šajā intervālā ir iespējams identificēt piecus izteiktus subhorizontālus atstarojumus, kā arī vairākus subhorizontālus atstarojumus, ko iespējams identificēt atsevišķās radarogrammas daļās. Makinu purvā ierakstīto radarogrammu analīzes gaitā uzmanība galvenokārt tika pievērsta izteiktajiem subhorizontālajiem atstarojumiem.

Visā ierakstītās radarogrammas garumā ir iespējams identificēt 1. ģeoradara signāla atstarojumu (4.14. attēls). Radarogrammas daļā līdz 26 m atzīmei 1. atstarojumam raksturīga salīdzinoši liela amplitūda, savukārt pārējā radarogrammas daļā 1. atstarojumam ir raksturīga salīdzinoši zema amplitūda. Intervālā no 32 m līdz 48 m atzīmei 1. atstarojuma identificēšana ir sarežģīta, kā rezultātā pie otrā urbuma nav iespējams noteikt laiku, pēc kura saņemts 1. atstarojums, ar augstu precizitāti. Amplitūdas atšķirības skaidrojamas ar to, ka 1. atstarojums radarogrammas sākuma daļā ir saņemts pēc mazāka laika intervālā nekā beigu daļā, kas savukārt liecina par to, ka ar atstarojumu saistītā elektromagnētisko īpašību robeža radiolokācijas profila beigu daļā ieguļ lielākā dziļumā.



4.14. attēls. Radarogramma Makinu-1

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.14. Radar image Makinu-1

Recorded with a 300 MHz antenna system.

Tāpat atzīmējams, ka līdz 28 m atzīmei 1. atstarojumu veido divi gandrīz pilnībā izšķirami atstarojumi (4.14. attēls). Pārējā radarogrammas daļā divu atsevišķu atstarojumu identificēšanu ierobežo zemā atstarojuma amplitūda. Minētais norāda uz to, ka 1. atstarojums ir saistāms ar divām atsevišķām atstarotājiervismām. Atzīmējams, ka radarogrammā, kas tika ierakstīta ar 100 MHz antenu sistēmu, apskatot 1. atstarojumu, nav iespējams izšķirt divus atsevišķus atstarojumus (2.7. attēls).

Otrais (2.) atstarojums ir izsekojams visā radarogrammā, tomēr atsevišķās vietās tā amplitūda ir salīdzinoši neliela (4.14. attēls). Radarogrammā intervālā līdz 14 m atzīmei 2. atstarojumu veido salīdzinoši plata josla, kurā vērojami vairāki atstarojumi. Minētais norāda uz to, ka šajā radarogrammas daļā 2. atstarojums ir saistīts ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām, nevis krasu elektromagnētisko īpašību robežu. Līdzīgi pie 42 m atzīmes 2. atstarojums ir saistāms ar salīdzinoši platu joslu, kurā vērojami vairāki atstarojumi. Aprakstītajai joslai raksturīga lēcveida forma. Līdzīgi kā gadījumā ar 1. atstarojumu, 2. atstarojums intervālā no 48 m līdz 55 m atzīmei ir salīdzinoši grūti identificējams.

Trešais (3.) atstarojums ir izsekojams intervālā no 19 m līdz 21 m radarogrammas garuma atzīmei (4.14. attēls). Kopumā 3. atstarojumam raksturīga neliela amplitūda, un tā identificēšana ir sarežģīta. Radarogrammas daļā līdz 19 m atzīmei 3. atstarojumu nav iespējams izšķirt no subhorizontāliem atstarojumiem, ko iespējams identificēt atsevišķās radarogrammas daļās. Radarogrammas daļās, kur 3. atstarojumam raksturīga salīdzinoši liela amplitūda, to veido josla, kurā vērojami vairāki atstarojumi. Minētais norāda uz atstarojuma saistību ar nelielām atsevišķās radiolokācijas profila daļās pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā.

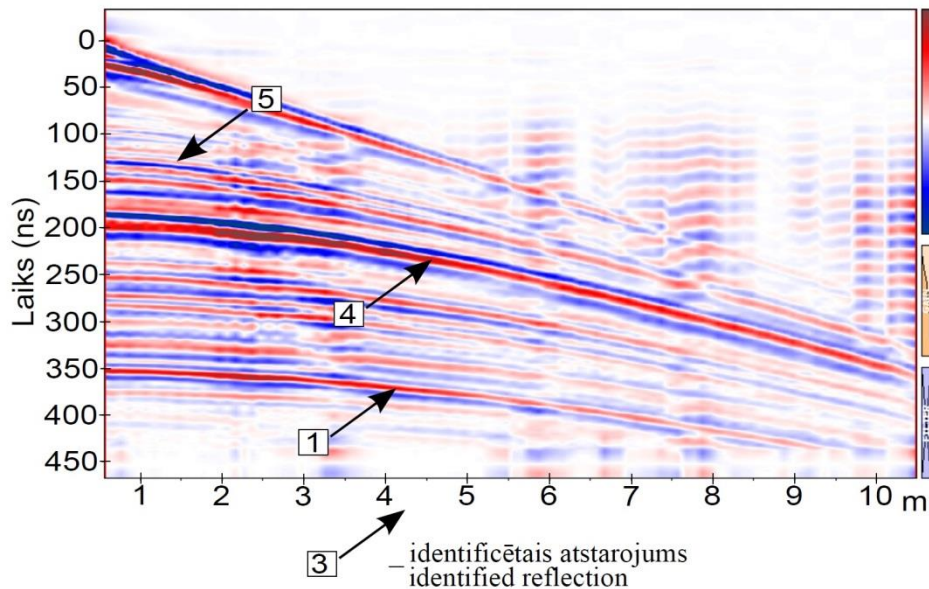
Ceturtais (4) atstarojums ir izsekojams visā radarogrammas garumā (4.14. attēls). Apskatot ceturto atstarojumu, praktiski visā radarogrammas garumā nav iespējams viennozīmīgi izšķirt pusotru signāla periodu. Aprakstītais atstarojums radarogrammā ir identificējams kā zona, kuru veido vairāki atstarojumi, nevis viens izteikts atstarojums. Minētais norāda uz to, ka 4. atstarojums ir saistīts ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām, nevis krasu to robežu.

Līdzīgi kā 4. Atstarojums, arī 5. atstarojums ir izsekojams visā radarogrammas garumā (4.14. attēls). Praktiski visā radarogrammas garumā 5. atstarojumu veido zona, kas sastāv no vairākiem atstarojumiem. Minētais norāda uz to, ka 5. atstarojums ir saistīts ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām, nevis krasu to robežu.

Gan 4., gan 5. atstarojumam ir raksturīgas nelielas amplitūdas svārstības visā radarogrammas garumā, kas norāda uz to, ka ar šiem atstarojumiem saistītā elektromagnētisko īpašību robeža nav vienlīdz izteikta visā radiolokācijas profila garumā.

Vadoties pēc pētījuma sākumā izstrādātās metodikas (2.3.9. nodaļa), CMP mērījumus pētījumu objektā Makinu-1 tika izvēlēts veikt pie 22 m atzīmes (4.14. attēls). Ņemot vērā to, ka radarogrammu, kas tika ierakstīta, veicot CMP mērījumus ar 300 MHz un 500 MHz antenu sistēmām, nav iespējams izmantot, lai aprēķinātu ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu līdz atstarotājpirmām (2.3.9. nodaļa), tā detalizēti netika analizēta. Detalizēta analizē tika veikta radarogrammai, kas tika ierakstīta, CMP mērījumus veicot ar 100 MHz antenu sistēmu.

CMP mērījumu laikā kopumā tika ierakstīti 100 atsevišķi zondējumi, atvirzot raidītāj un uztvērēj antenas vienu no otras līdz 10,47 m attālumam (4.15. attēls). Kopumā, apskatot ierakstīto radarogrammu, tika konstatēts, ka tā satur salīdzinoši daudz atstarojumu, kas sarežģī interesējošo atstarojumu identificēšanu.



4.15. attēls. Radarogramma Makinu-cmp-100

Ieraksts veikts, izmantojot 100 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.15. Radar image Makinu-cmp-100

Recorded using a 100 MHz antenna system.

Trīs (1., 4. un 5.) no pieciem radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētajiem atstarojumiem tika identificēti arī CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā (4.15. attēls).

Otrā (2.) un 3. atstarojuma vienošķīgu identificēšanu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā traucēja salīdzinoši daudzie atstarojumi, kas radarogrammā ir identificējami intervālā no 250 ns līdz 350 ns laika atzīmei (4.15. attēls).

Pirmais (1.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz pat 89. zondējumam, kas atbilst 9,37 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atlikušajos zondējumos 1. atstarojuma amplitūda bija pārāk maza, lai to būtu iespējams vienošķīgi identificēt.

Savukārt 4. atstarojumu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā bija iespējams izsekots līdz 77. zondējumam, kas atbilst 8,02 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atlikušajos zondējumos 4. atstarojums pārklājās ar citiem atstarojumiem, kā rezultātā tā identificēšana nebija iespējama.

Piektais (5.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz 58. zondējumam, kas atbilst 6,12 m attālumam starp ģeoradara antenām. Tālāku 5. atstarojuma izsekošanu traucēja neinformatīvie signāli, kurus nebija iespējams dzēst radarogrammu apstrādes laikā.

Izmantojot iegūtos mērījumus, tika aprēķināts ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums un tam atbilstošā  $\epsilon$  līdz ar šiem atstarojumiem saistītajām atstarotājpovirsmām. Rezultātā pēc 2.3.7. nodaļā aprakstītās metodikas tika aprēķināts dziļums, no kura ir saņemti visi radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi (4.5. tabula).

#### 4.5. tabula. Ar radarogrammā Makinu-1 identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\epsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotājpovirsmi (2.3.7. nodaļa).

Table 4.5. Results of calculations based on identified reflections of Makinu-1 radar image  
Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\epsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.14.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums (m s <sup>-1</sup> )	Atbilstošā $\epsilon$	Atstarotājpovirsmas dziļums no zemes virsmas (m)	
			1. urbums	2. urbums
1.	35482389	71,39	6,14	6,51*
2.	-	-	5,01***	4,92***
3.	-	-	4,40***	4,07***
4.	34431090	75,81	3,38	3,07*
5.	34140884	77,11	2,38	2,30*

#### 4.3.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija

Pētījuma gaitā uz radiolokācijas profila Makinu-1 tika izvietoti divi urbumi. Pirmajā urbumā (U. 1.) purva gultne tika sasniegta 6,17 m dziļumā, savukārt otrajā urbumā (U. 2.) 6,48 m dziļumā (4.16. attēls). Abos urbumos tika konstatēts, ka purva gultni veido aleirīts ar smalkas smilts un organiskās vielas piejaukumu.

Laboratoriski analizējot no ierīkotajiem urbumiem iegūtos kūdras paraugus, tika konstatēts, ka virs purva gultnes iegūļ zilaļģu sapropeļa slānis, kas pie 1. urbuma ir aptuveni septiņus centimetrus biezs, savukārt pie 2. urbuma jau vairāk kā 25 cm biezs. Virs sapropeļa slāņa uzguļ aptuveni 25 cm biezs zemā tipa kūdras slānis, ko veido hipnu un zāļu sfagnu kūdra. Slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 25% (4.16. attēls).



atstarojums, no abiem atsevišķajiem atstarojumiem tika izmantots ātrāk saņemtais. Ņemot vērā to, ka aprēķinātais dziļums, no kura saņemts 1. atstarojums, praktiski neatšķiras no urbomos konstatētā purva gultnes dziļuma, domājams, ātrāk saņemtais atstarojums ir saistāms ar purva gultni. Sekojoši otrais atsevišķais atstarojums norāda uz vēl vienu atstarotārvirsmu, kas iegūl dziļāk par purva gultni. Rezultātā pētījumu teritorijā sastopamais sapropēja slānis ir saistāms ar identificētajiem atstarojumiem, tikai gadījumā, ja aprēķinātais dziļums, no kura ir saņemts 1. atstarojums, ir salīdzinoši neprecīzs (4.5. tabula).

Otrā (2.) atstarojuma raksturojums norāda uz tā saistību ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā griezumā (4.3.1. nodaļa). Kā redzams pie abiem ierīkotajiem urbumiem, dziļumā, no kura ir saņemts 2. atstarojums, ir identificētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.16. attēls). Pie tam 2. urbuma griezumā atzīmētās sadalīšanās pakāpes izmaiņas ir pakāpeniskas. Minētais norāda uz 2. atstarojuma saistību ar aprakstītajām kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām.

Atzīmējams, ka 2. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kurā iespējams identificēt intervālu, kam raksturīgais mitruma daudzums ir aptuveni par 4% mazāks nekā pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos (4.16. attēls). Rezultātā nevar viennozīmīgi izslēgt arī mitruma daudzuma izmaiņu saistību ar 2. atstarojumu.

Dziļumā, no kura saņemts 3. atstarojums, pie 2. urbuma vērojams intervāls, kam raksturīgais mitruma daudzums ir aptuveni par 4% mazāks nekā pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos (4.16. attēls). Līdzīgi pie 1. urbuma 3. atstarojums tika saņemts no 4,40 m dziļuma, kur vērojams aptuveni 25 cm plats intervāls, kam raksturīgs mazāks mitruma daudzums. Sekojoši 3. atstarojums tika saistīts ar aprakstītajām mitruma daudzuma izmaiņām.

Dziļumā, no kura saņemts 4. atstarojums, pie 2. urbuma vērojams aptuveni 30 cm plats intervāls, kam raksturīgais mitruma daudzums ir aptuveni par 4% mazāks nekā pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos (4.16. attēls). Tāpat pie 1. urbuma 4. atstarojums tika saņemts no dziļuma, kur vērojams aptuveni 40 cm plats intervāls, kam raksturīgais mitruma daudzums ir aptuveni par 2,5% mazāks nekā pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos.

Atzīmējams, ka 4. atstarojuma raksturojums norāda uz tā saistību ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām (4.3.1. nodaļa). Aprakstītajā dziļuma intervālā kūdras mitruma daudzuma izmaiņas ir pakāpeniskas. Proti, zemākais mitruma daudzums vērojams intervāla vidū, kamēr, tuvojoties izdalītā intervāla robežām, mitruma daudzums pakāpeniski palielinās (4.16. attēls). Sekojoši 4. atstarojums tika saistīts ar aprakstītajām mitruma daudzuma izmaiņām.

Pie 1. urbuma 2,35 m dziļumā vērojama augšējā robeža 40 cm platumam intervālam ar salīdzinoši zemāku mitruma daudzumu (4.16. attēls). 2,60 m dziļuma vērojams izdalītajā intervālā zemākais kūdras mitruma daudzums, kas ir aptuveni par 4% mazāks nekā pagulošajos un uzgulošajos kūdras slāņos. Tāpat pie 1. urbuma 2,65 m dziļumā vērojams salīdzinoši plāns kūdras slānis, kam raksturīga augstāka sadalīšanās pakāpe nekā pagulošajiem un uzgulošajiem kūdras slāņiem. Savukārt 5. atstarojums pie 1. urbuma tika saņemts no 2,38 m dziļuma (4.5. tabula).

Apskatot 2. urbumā identificētās kūdras īpašību izmaiņas, tika konstatēts, ka dziļumā, no kura saņemts 5. atstarojums, ir vērojamas nelielas mitruma daudzuma izmaiņas, kas nepārsniedz 2% (4.16. attēls). Būtiski atzīmēt, ka 2,30 m dziļumā tika identificēts salīdzinoši plāns kūdras slānis, kam raksturīga augstāka sadalīšanās pakāpe nekā pagulošajiem un uzgulošajiem kūdras slāņiem.

Kā redzams pie 1. urbuma, dziļumā, no kura saņemts 5. atstarojums, vērojamas gan mitruma daudzuma, gan kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas, savukārt pie 2. urbuma



attiecīgajā dziļumā vērojamas tikai kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.16. attēls). Minētais norāda uz to, ka 5. atstarojums ir saistāms ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām, taču iespējama ir arī tā saistība ar mitruma daudzuma izmaiņām.

#### 4.4. Laugas purvs

Pētījumu objektā „Laugas-1” tika ierīkots 40 m garš radiolokācijas profils (3.4. nodaļa; 4.17. attēls). Lai būtu iespējams sasaistīt identificētos radiolokācijas signāla atstarojumus ar kūdras fizikālo īpašību izmaiņām pētījumu objekta ģeoloģiskajā griezumā, tieši uz radiolokācijas profila līnijas tika ierīkoti seši urbumi (4.17. attēls). Gan radiolokācijas mērījumi, gan ģeoloģiskie pētījumi tika veikti 2014. gada jūlijā.

Līdzīgi kā veicot pētījumus Makinu purvā, analizējot sākotnēji iegūtos radiolokācijas mērījumus, tika konstatēts, ka radarogrammā, kas ierakstīta CMP mērījumu laikā, visiem atstarojumiem ir pārāk maza amplitūda, lai to izsekošana būtu viennozīmīga. Sekojoši, 2014. gada jūlijā CMP mērījumi tika veikti atkārtoti, izmantojot 100 MHz antenu sistēmu (2.3.9. nodaļa).

##### 4.4.1. Radiolokācijas mērījumi

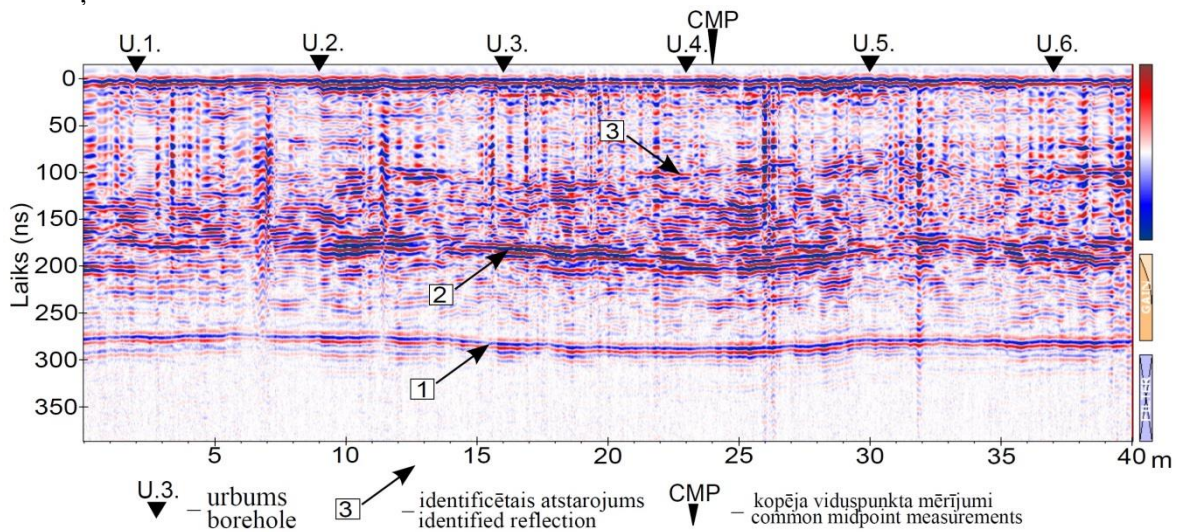
Laugas purvā Radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā ģeoradara signāla atstarojumi ir identificējami līdz pat 300 ns laika atzīmei (4.17. attēls). Kopumā ierakstītajā radarogrammā ir iespējams identificēt salīdzinoši daudz atsevišķās radarogrammas daļās izsekojamus subhorizontālus atstarojumus. Īpaši daudz šādu atstarojumu ir vērojami intervālā no 100 ns laika atzīmes līdz 200 ns laika atzīmei. Tomēr radarogrammā ir iespējams identificēt arī trīs subhorizontālus atstarojumus, kas ir izsekojami praktiski visā radarogrammas garumā. Iegūto radiolokācijas mērījumu analīzes gaitā uzmanība galvenokārt tika pievērsta šiem trijiem subhorizontālajiem atstarojumiem (4.17. attēls).

Viennozīmīgi visā radarogrammas garumā ir iespējams identificēt 1. ģeoradara signāla atstarojumu (4.17. attēls). Neskatoties uz to, ka identificētais atstarojums ir saņemts pēc vairāk kā 250 ns, tam ir salīdzinoši liela amplitūda, kas norāda uz to, ka tas ir saistīts ar izteiktām nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Atzīmējams, ka aprakstītais atstarojums visā radarogrammas garumā ir vienā fāzē ar tiešo signālu. Minētais norādu uz to, ka nogulumiem, kas paguļ atstarotā jvirsmai, kas saistīta ar šo atstarojumu, ir mazāks gaismas laušanas koeficients nekā uzguļošajiem nogulumiem. Aprakstītā atstarojuma īpašības noteica to, ka jau pētījuma sākumposmā tas tika saistīts ar purva gultni.

Analizējot 1. atstarojumu, tika konstatēts, ka radarogrammā pēc tā vērojama aptuveni 20 ns plata josla, kurā iespējams identificēt vairākus subhorizontālus atstarojumus ar salīdzinoši zemu amplitūdu. Identificētie atstarojumi liecina par to, ka 1. atstarojums saistāms ar augšējo robežu nogulumu slānim, kuram raksturīga pakāpeniska elektromagnētisko īpašību mainība.

Otrajam (2.) atstarojumam kopumā raksturīga salīdzinoši zema amplitūda. Pie tam radarogrammas intervālā līdz 2. urbumam 2. atstarojuma identificēšana ir neviennozīmīga. Tāpat atstarojums praktiski visā radarogrammas garumā ir identificējams kā zona, kuru veido vairāki atstarojumi (4.17. attēls). Minētais norāda uz atstarojuma saistību ar pakāpeniskām atsevišķās radiolokācijas profila daļās, nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā. Tāpat, apskatot 2. atstarojumu, vērojamas nelielas tā amplitūdas svārstības visā radarogrammas garumā. Ņemot vērā to, ka minētās

lokālās amplitūdas izmaiņas tanīs pašās radarogrammas daļās ir vērojamas arī, apskatot 1. atstarojumu, tās vistīcāmāk ir saistītas ar antenu sistēmas kontakta ar zemes virskārtu izmaiņām (2.2. nodaļa) nevis robežas, kas izraisījusi 2. atstarojumu, kontrastainības izmaiņām.



4.17. attēls. Radarogramma Laugas-1

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.17. Radar image Laugas-1

Recorded with a 300 MHz antenna system.

Līdzīgi kā 2. atstarojumam, arī 3. atstarojumam raksturīga salīdzinoši zema amplitūda. Pie tam vairākos radarogrammas posmos atstarojuma mazā amplitūda liedz tā izšķiršanu no atsevišķiem lokāliem atstarojumiem, kas saistāmi ar lokālām nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Minētais norāda uz atstarojuma saistību ar nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā. Kopumā laiku, pēc kura saņemts 3. atstarojums, ar augstu precizitāti nebija iespējams noteikt ne pie viena no ierīkotajiem urbumiem.

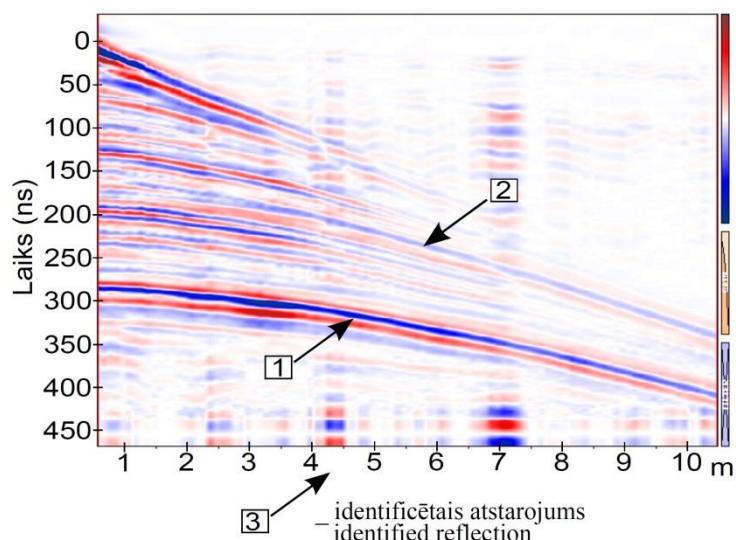
Vadoties pēc pētījuma sākumā izstrādātās metodikas (2.3.9. nodaļa), CMP mērījumus pētījumu objektā Laugas-1 tika izvēlēts veikt pie 23,5 m atzīmes (4.17. attēls). Līdzīgi kā apskatot Makinu purvā iegūtos rezultātus (4.3.1. nodaļa), detalizēta analizē tika veikta radarogrammai, kas tika ierakstīta, CMP mērījumus veicot ar 100 MHz antenu sistēmu.

CMP mērījumu laikā kopumā tika ierakstīti 100 atsevišķi zondējumi, atvirzot raidītāj un uztvērēj antenas vienu no otras līdz 10,47 m attālumam (4.18. attēls).

Divi (1. un 2.) no trīs radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētajiem atstarojumiem tika identificēti arī CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā (4.18. attēls). Trešā (3.) atstarojuma viennozīmīgu identificēšanu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā traucēja tā salīdzinoši zemā amplitūda.

Pirmais (1.) atstarojums CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā tika izsekots līdz pat 97. zondējumam, kas atbilst 10,17 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atlikušajos zondējumos 1. atstarojuma amplitūda bija pārāk maza, lai to būtu iespējams viennozīmīgi identificēt.

Savukārt 2. atstarojumu CMP mērījumu laikā ierakstītajā radarogrammā bija iespējams izsekot visos 100 ierakstītajos zondējumos, kas atbilst 10,47 m attālumam starp ģeoradara antenām. Atzīmējams, ka 2. atstarojumu bija iespējams identificēt, tikai sākot no 21. zondējuma.



4.18. attēls. Radarogramma Laugas-cmp-100

Ieraksts veikts, izmantojot 100 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.18. Radar image Laugas-cmp-100

Recorded using a 100 MHz antenna system.

Izmantojot iegūtos mērījumus, tika aprēķināts ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums un tam atbilstošā  $\epsilon$  līdz ar šiem atstarojumiem saistītajām atstarotājsvīrmām. Rezultātā pēc 2.3.7. nodaļā aprakstītās metodikas tika aprēķināts dziļums, no kura ir saņemti visi radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi (4.6. tabula un 4.7.tabula).

4.6. tabula. Ar radarogrammā Laugas-1 identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti I

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\epsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotājsvīrmai (2.3.7. nodaļa).

Table 4.6. Results of calculations based on identified reflections of Laugas-1 radar image I  
Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\epsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.17.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ( $\text{m s}^{-1}$ )	Atbilstošā $\epsilon$	Atstarotājsvīrmās dziļums no zemes virsmas (m)		
			1. urbums	2. urbums	3. urbums
1.	36083237	69,03	5,06	5,06	5,20
2.	34842502	74,03	3,04	3,13	3,26
3.	-	-	2,28***	1,87***	1,87***

#### 4.7. tabula. Ar radarogrammā Laugas-1 identificētajiem atstarojumiem veikto aprēķinu rezultāti II

Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi un tiem atbilstošās  $\varepsilon$  vērtības aprēķinātas pēc 1.2.5. nodaļā un 1.1.1. nodaļā aprakstītās metodikas.

\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo laiks, pēc kura saņemts atstarojums, noteikts ar zemāku precizitāti (2.3.8. nodaļa). \*\* - dziļuma vērtības, kuras aprēķinātas ar mazāku precizitāti, jo nav noteikts izplatīšanās ātrums līdz konkrētajai atstarotājuvirsmi (2.3.7. nodaļa).

Table 4.7. Results of calculations based on identified reflections of Laugas-1 radar image  
II

Ground penetrating radar signal propagation speeds and corresponding  $\varepsilon$  values were calculated according to the methods described in sections 1.2.5. and 1.1.1.

\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to lower degree of accuracy of time fixation of reflection (section 2.3.8.). \*\* - depth values are calculated with a lower degree of accuracy due to unknown propagation speed above the reflecting surface (section 2.3.7.).

Atstarojuma numurs pēc attēla 5.17.	Ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums ( $m s^{-1}$ )	Atbilstošā $\varepsilon$	Atstarotājuvirsmas dziļums no zemes virsmas (m)		
			4. urbums	5. urbums	6. urbums
1.	36083237	69,03	5,29	5,14	5,16
2.	34842502	74,03	3,42	3,32	3,36
3.	-	-	1,87***	1,54***	1,75***

#### 4.4.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija

Pētījuma gaitā uz radiolokācijas profila Laugas-1 tika izvietoti seši urbumi. Pirmajā urbumā (U. 1.) un otrajā urbumā (U. 2.) purva gultne tika sasniegta 4,88 m dziļumā, trešajā urbumā (U. 3.) un ceturtajā urbumā (U. 4.) purva gultne tika sasniegta 5,12 m dziļumā, piektajā urbumā (U. 5.) purva gultne tika sasniegta 4,94 m dziļumā, un sestajā urbumā (U. 5.) purva gultne tika sasniegta 4,96 m dziļumā (4.20. attēls). Visos pētījuma gaitā ierīkotajos urbumos tika konstatēts, ka purva gultni veido aleirīts ar smalkas smilts un organiskās vielas piejaukumu.

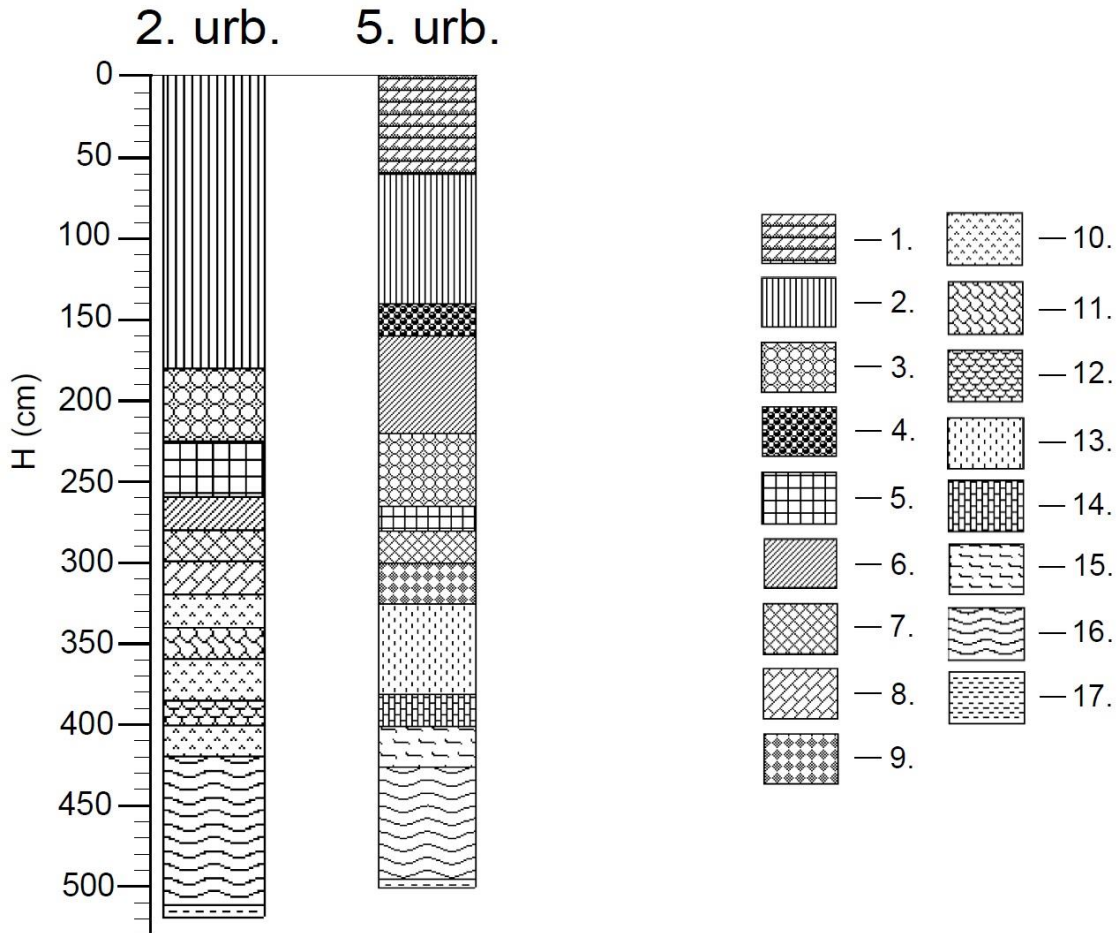
Laboratoriski analizējot no ierīkotajiem urbumiem iegūtos nogulumu paraugus, tika konstatēts, ka virs purva gultnes iegul aptuveni 0,7 m biezs sapropeļa slānis (4.19. attēls).

Tālāk sapropeļa slāni pārsedz vienu metru biezs zemā tipa kūdras slānis, ko veido galvenokārt zāļu, grīšļu un niedru kūdra. Aprakstītajam slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 30%. Zemā tipa kūdras slāni pārsedz plāns 20 cm biezs pārejas tipa kūdras slānis, ko veido zāļu un šeihcēriju kūdra. Slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 26%.

Purva virsējo slāni, kas ir trīs metrus biezs, veido augstā tipa kūdras slānis. Augstā tipa kūdras slāni pamatā veido fuskuma sfagnu kūdra, taču ir sastopama arī spilvju sfagnu, magelānsfagnu un šaurlapu sfagnu kūdra. Slānim raksturīga visai mainīga sadalīšanās pakāpe (4.22. attēls).

Kā redzams pie visiem ierīkotajiem urbumiem, 1. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas ir aptuveni par 20 cm lielāks nekā dziļums, kurā uršanas laikā tika sasniegta purva gultne (4.20. attēls), kas salīdzinoši ar pārējos disertācijā apskatītajos pētījumu objektos sasniegto precizitāti uzskatāma par lielu atšķirību. Izņēmums ir 3. urbums, pie kura dziļums, no kura saņemts 1. atstarojums, tikai par astoņiem centimetriem atšķiras no dziļuma, kurā sasniegta purva gultne. Taču ņemot vērā to, ka sapropelīm un aleirītam ir izteikti atšķirīgas elektromagnētiskās īpašības (Jol, 2009), robeža starp šiem nogulumiem

varētu izraisīt 1. atstarojuma raksturojumam atbilstošu ģeoradara signāla atstarojumu. Rezultātā 1. atstarojums tika saistīts ar purva gultni.



4.19. attēls. Laugas purva ģeoloģiskais griezum pie 2. un 5. urbuma

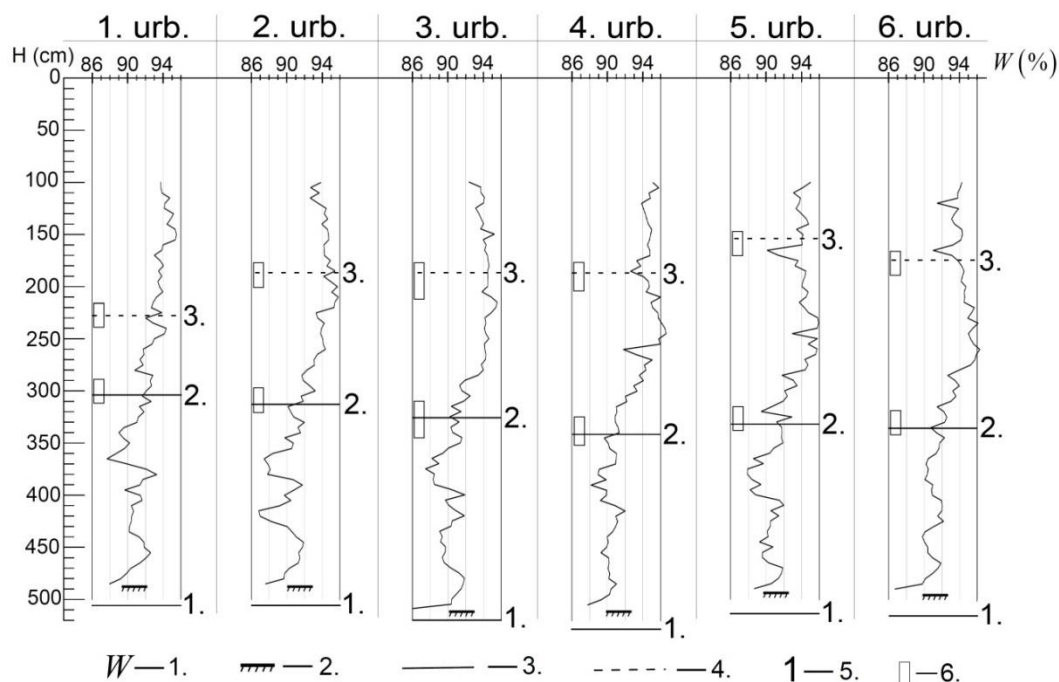
Apzīmējumi: Augstā tipa kūdra: 1 – sīkrūmu-sfagnu; 2 – fuskuma sfagnu; 3 – magelānsfagnu; 4 – priežu-sfagnu; 5 – šaurlapu sfagnu; 6 – spilvju-sfagnu; 7 – šeihcēriju-sfagnu. Pārejas tipa kūdra: 8 – zāļu; 9 – šeihcēriju. Zemā tipa kūdra: 10 – zāļu; 11 – zāļu-hipnu; 12 – grīšļu-hipnu; 13 – grīšļu; 14 – niedru; 15 – šeihcēriju. 16 – Sapropelis. Minerālgrunts: 17 – aleirīts.

Figure 4.19. Geological section of Laugas bog at boreholes 2 and 5

Legend: Raised bog peat: 1 – dwarf shrubs-*Sphagnum*; 2 – *S. fuscum*; 3 – *S. magellanicum*; 4 – pine-*Sphagnum*; 5 – *S. angustifolium*; 6 – Cotton grass-*Sphagnum*; 7 – *Scheuchzeria-Sphagnum*. Transitional bog peat: 8 – grass; 9 – *Scheuchzeria*. Fen peat: 10 – grass; 11 – grass-*Hypnum*; 12 – Sedge-*Hypnum*; 13 – Sedge; 14 – *Phragmites*; 15 – *Scheuchzeria*. 16 – gyttja. Mineralsoil: 17 – silt.

Analizējot pētījuma laikā iegūtos rezultātus, tika konstatēts, ka dziļumā, no kura ir ticis saņemts 2. atstarojums, ne pie viena no ierīkotajiem urbumiem nav vērojamas ne izteiktas mitruma daudzuma izmaiņas, ne nogulumu pelnainības izmaiņas (4.20. attēls un 4.21. attēls). Maz ticama ir arī 2. atstarojuma saistība ar robežu starp kūdras slāni un sapropela slāni, jo gan pie 2. Urbuma, gan pie 5. urbuma minētā robeža aptuveni par metru pārsniedz dziļumu, no kura ir saņemts 2. atstarojums (4.19. attēls, 4.6. tabula un 4.7. tabula). Tāpat, neskatoties uz to, ka pie 5. urbuma 2. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas iekrīt plaša intervāla, kurā pakāpeniski palielinās kūdras sadalīšanās pakāpe, vidusdaļā, to nav iespējams skaidrot ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām, jo pie 2. urbuma dziļumā, no kura saņemts 2. atstarojums, sadalīšanās pakāpes izmaiņas nav vērojamas (4.22. attēls).

Atzīmējams, ka 2. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas ir salīdzinoši tuvs dziļumam, kurā iegūļ pārejas tipa kūdras slānis (4.19. attēls, 4.6. tabula un 4.7. tabula).

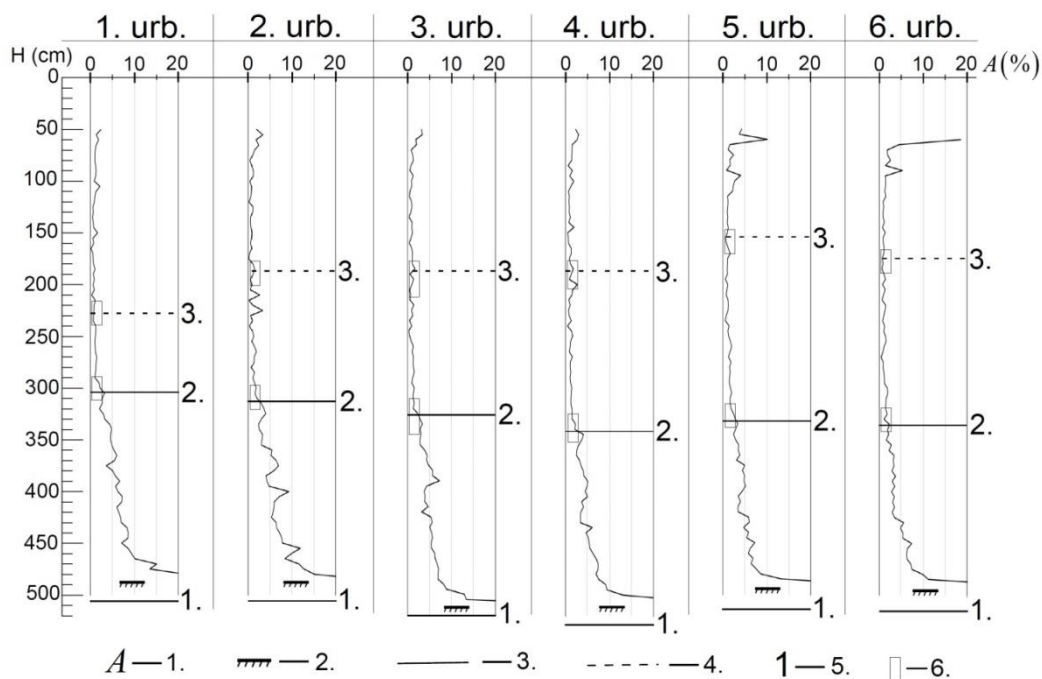


4.20. attēls. Kūdras mitruma daudzuma izmaiņas Laugas purva ģeoloģiskajā griezumā gar radiolokācijas profilu Laugas-1

Apzīmējumi: 1 – mitruma daudzums; 2 – purva gultne; 3 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājrivsmas dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 4 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotājrivsmas dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 5 – atstarojuma numurs; 6 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.20. Changes of peat moisture content in geological section of Laugas bog along GPR profile Laugas-1

Legend: 1 – moisture content; 2 – mineral bed of the bog; 3 – reflection representing a reflecting surface with a precisely know depth; 4 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 5 – number of reflection; 6 – depth interval of reflection.



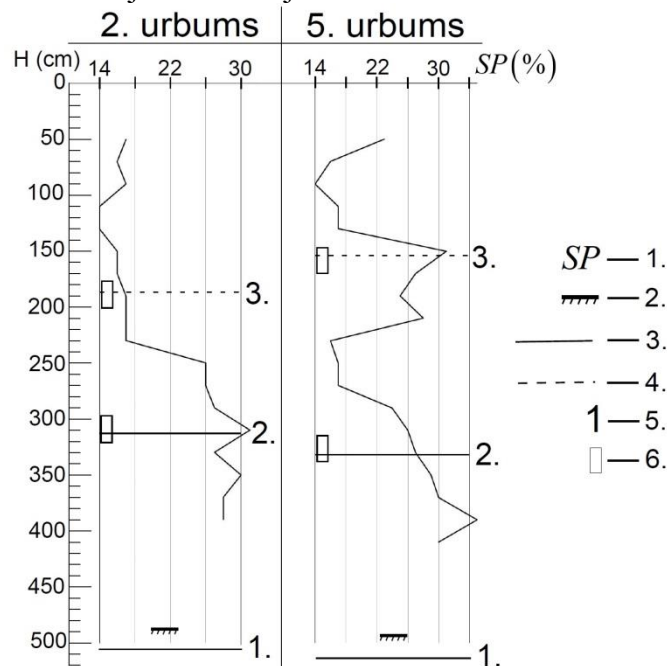
4.21. attēls. Kūdras pelnainības izmaiņas Laugas purva ģeoloģiskajā griezumā gar radiolokācijas profilu Laugas-1

Apzīmējumi: 1 – pelnainība; 2 – purva gultne; 3 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotārvirsmas dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 4 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotārvirsmas dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 5 – atstarojuma numurs; 6 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.21. Changes of peat ash content in geological section of Laugas bog along GPR profile Laugas-1

Legend: 1 – ash content; 2 – mineral bed of the bog; 3 – reflection representing a reflecting surface with a precisely know depth; 4 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 5 – number of reflection; 6 – depth interval of reflection.

Līdzīgi kā gadījumā ar 2. Atstarojumu, arī 3. atstarojumu nav iespējams saistīt ne ar mitruma daudzuma izmaiņām, ne nogulumu pelnainības izmaiņām (4.20. attēls un 4.21. attēls). Atzīmējams, ka pie 4., 5. un 6. urbuma dziļumā, no kura saņemts 3. atstarojums, vērojams šaurs slānis ar salīdzinoši zemāku mitruma daudzumu, taču pie 1., 2. un 3. urbuma aprakstītais slānis nav vērojams, kas norāda uz to, ka tas nav izturēts visā pētījumu teritorijā un nevar būt izraisītājs 3. atstarojumu.



4.22. attēls. Kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas Laugas purva ģeoloģiskajā griezumā pie 2. un 5. urbuma

Apzīmējumi: 1 – kūdras sadalīšanās pakāpe; 2 – purva gultne; 3 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotārvirsmas dziļums noteikts ar augstu precizitāti; 4 – atstarojums, ar kuru saistītās atstarotārvirsmas dziļums noteikts ar zemāku precizitāti; 5 – atstarojuma numurs; 6 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.22. Changes of degree of peat decomposition in geological section of Laugas bog at boreholes 2 and 5

Legend: 1 – peat degree of decomposition; 2 – mineral bed of the bog; 3 – reflection representing a reflecting surface with a precisely know depth; 4 – reflection representing a reflecting surface with an imprecisely known depth; 5 – number of reflection; 6 – depth interval of reflection.

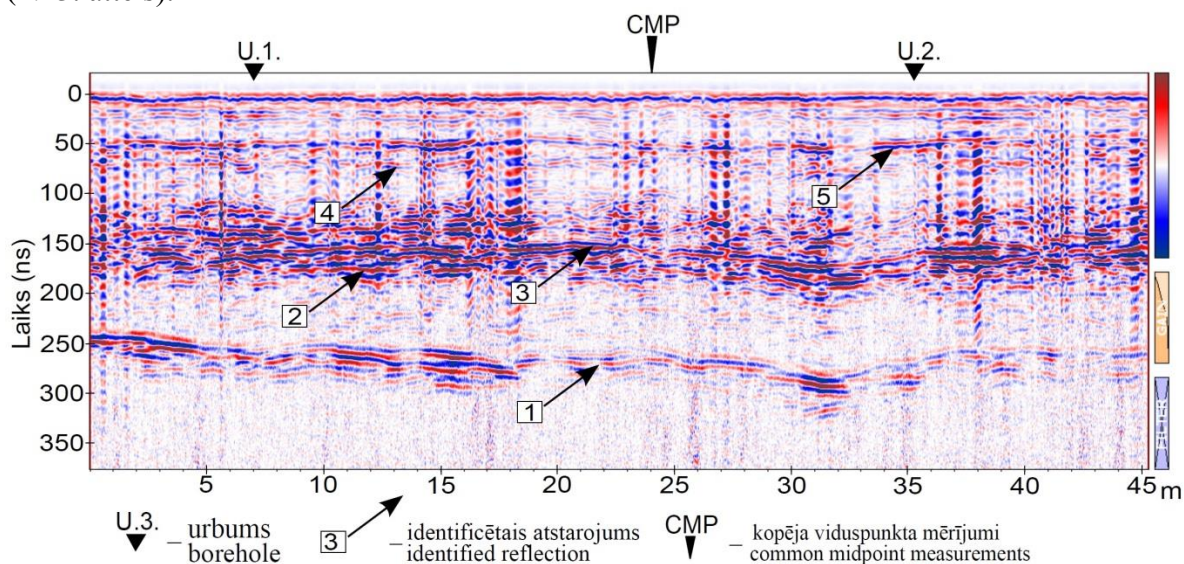
Pie 5. urbuma 3. atstarojums ir saņemts no 1,54 m dziļuma (4.7. tabula). Savukārt 5. urbuma griezumā 1,50 m dziļumā tika identificētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas, kas norāda uz iespējamu saistību starp iegūto atstarojumu un kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām (4.22. attēls). Tomēr pie 2. urbuma šādas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas atbilstošajā dziļumā netika konstatētas, kas norāda uz to, ka 5. urbumā vērojamas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas ir lokālas. Rezultātā arī 3. atstarojumu nav iespējams skaidrot ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām.

## 4.5. Raganu purvs

Raganu purvā ierīkotajā pētījumu objektā tika ierīkots 45,2 m garš radiolokācijas profils (3.5. nodaļa; 4.23. attēls). Lai būtu iespējams sasaistīt ierakstītajā radarogrammā identificētos atstarojumus ar kūdras fizikālo īpašību izmaiņām pētījumu objekta ģeoloģiskajā griezumā, tieši uz radiolokācijas profila līnijas tika ierīkoti divi urbumi (4.23 attēls). Gan radiolokācijas mērījumi, gan ģeoloģiskie pētījumi tika veikti 2013. gada jūlijā.

### 4.5.1. Radiolokācijas mērījumi

Radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītās radarogrammas analīzes laikā tika konstatēts, ka ģeoradara signāla atstarojumi ir identificējami līdz pat 320 ns laika atzīmei (4.23. attēls). Šajā intervālā ir iespējams identificēt vairākus atstarojumus, kas saistīti ar nogulumu elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētījumu objekta ģeoloģiskajā griezumā. Iegūto radiolokācijas mērījumu analīzes gaitā uzmanība galvenokārt tika pievērsta četriem subhorizontālajiem atstarojumiem, kurus ir iespējams identificēt ierakstītajā radarogrammā (4.23. attēls).



4.23. attēls. Radarogramma Raganu-1

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu.

Figure 4.23. Radar image Raganu-1

Recorded with a 300 MHz antenna system.

Visā radarogrammas garumā aptuveni pie 270 ns laika atzīmes ir vērojama zona ar vairākiem atstarojumiem – kas pētījumā tika identificēta kā 1. atstarojums (4.23. attēls). Atsevišķās radarogrammas daļās 1. atstarojumam ir raksturīga salīdzinoši maza amplitūda (piemēram, pie 20 m un 42 m atzīmes), tomēr tas netraucē atstarojuma identificēšanu. Minētais norāda uz 1. atstarojuma saistību ar pakāpeniskām atsevišķās radiolokācijas profila daļās, nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā. Ņemot vērā to, ka no visiem identificētajiem atstarojumiem šis atstarojums ierakstītajā radarogrammā ir reģistrēts pēc vislielākā laika intervāla, tas pētījuma sākumā tika sasaistīts ar purva gultni.

Salīdzinoši viegli visā radarogrammas garumā ir iespējams identificēt gan 2., gan 3. ģeoradara signāla atstarojumu (4.23. attēls). Apskatot minētos atstarojumus, tikai atsevišķās radarogrammas vietās ir iespējams viennozīmīgi izšķirt pusotru periodu garus



signālus. Radarogrammā intervālā līdz 15 m atzīmei aprakstītos atstarojumus nav iespējams izšķirt, un tie kopumā veido vairāk kā 50 ns platu zonu.

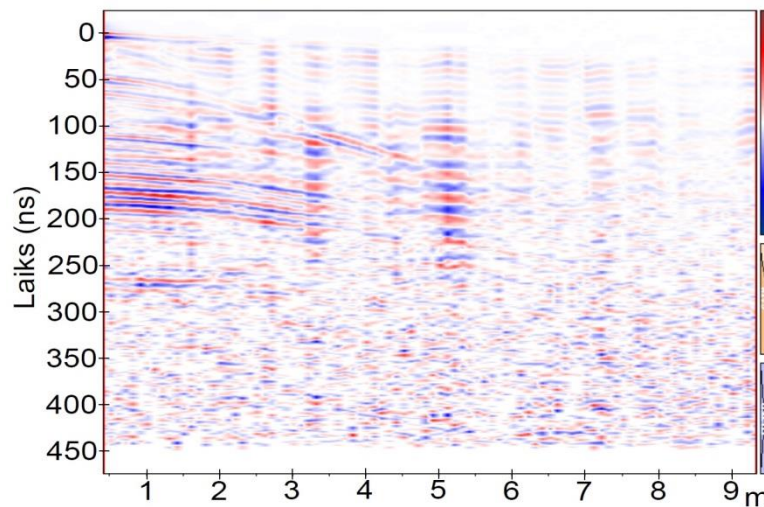
Minētais norāda uz to, ka 2. un 3. atstarojums ir saistāmi ar divām atstarotājevismām, kas iegul salīdzinoši tuvu, pie tam ar šiem atstarojumiem saistītās elektromagnētisko īpašību robežas atsevišķās radarogrammas daļās ir pakāpeniskas un neizteiktas.

Ceturta (4.) atstarojuma izsekošana visā radarogrammas garumā ir aprūtināta (4.23. attēls). Atsevišķās radarogrammas vietās atstarojumu praktiski nav iespējams identificēt (piemēram pie 3 m un 26 m atzīmes), un tā amplitūda kopumā ir salīdzinoši neliela. Minētais norāda uz atstarojuma saistību ar nelielām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā.

Salīdzinoši viegli visā radarogrammas garumā ir iespējams izsekot 5. ģeoradara signāla atstarojumu (4.23. attēls). Tāpat, apskatot 5. atstarojumu, vērojamas nelielas tā amplitūdas svārstības visā radarogrammas garumā. Domājams, ka tās ir saistītas ar antenu sistēmas kontakta ar zemes virskārtu izmaiņām (2.2. nodaļa), nevis robežas, kas izraisījusi 5. atstarojumu, kontrastainības izmaiņām.

Kopumā atzīmējams, ka laiku, pēc kura saņemts atstarojums, ar augstu precizitāti izdevās noteikt tikai, analizējot 5. atstarojumu. Pārējos no analizētajiem atstarojumiem atsevišķos zondējumos identificēt nebija iespējams.

Ņemot vērā pētījuma sākumā izstrādāto metodiku (2.3.9. nodaļa), CMP mērījumus pētījumu objektā Ragana-1 tika izvēlēts veikt pie 24 m atzīmes (4.23. attēls). CMP mērījumu laikā kopumā tika ierakstīti 90 atsevišķi zondējumi, atvirzot raidītāji un uztvērēji antenas vienu no otras līdz 9,32 m attālumam (4.24. attēls).



4.24. attēls. Radarogramma Ragana-1-cmp

Ieraksts veikts, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu kā raidītāju un 500 MHz antenu sistēmu kā uztvērēju.

Figure 4.24. Radar image Ragana-1-cmp

Recorded with a 300 MHz antenna system as a transmitter and a 500 MHz antenna system as a receiver.

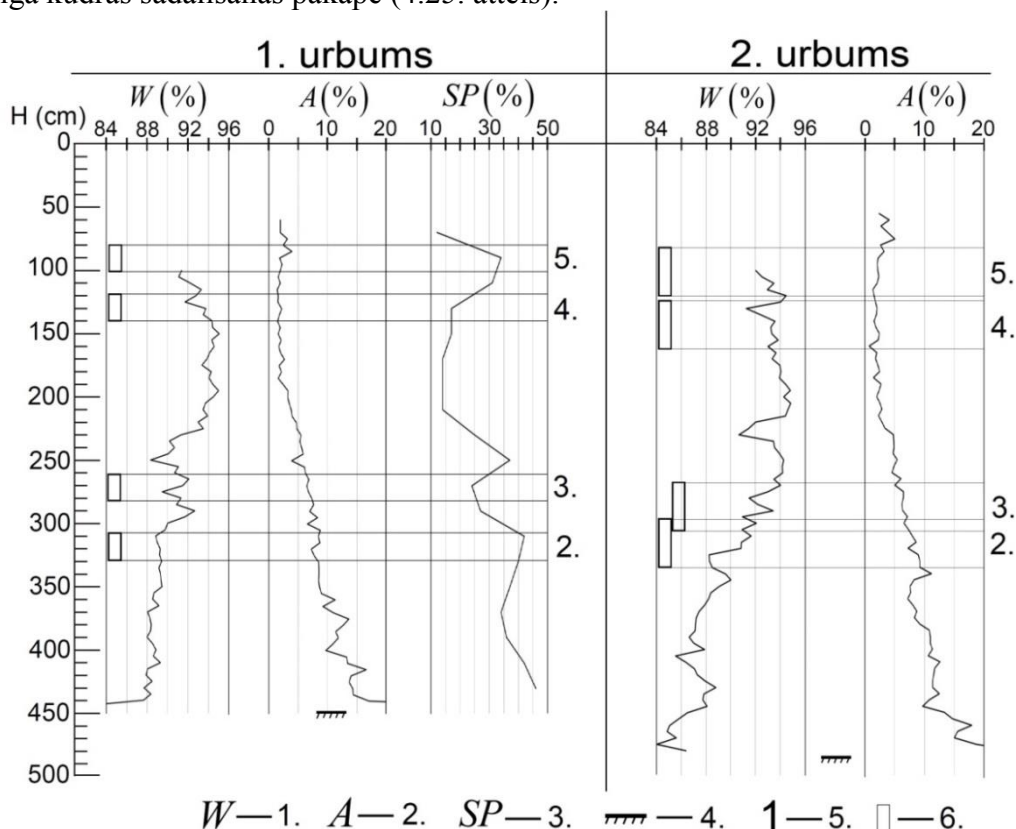
Analizējot CMP mērījumu laikā ierakstīto radarogrammu, tika konstatēts, ka tajā nav iespējams identificēt nevienu atstarojumu pietiekošā skaitā zondējumu, lai būtu iespējams salīdzinoši precīzi aprēķināt ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu pētījumu teritorijā sastopamajos nogulumu slāņos. Rezultātā dziļums, no kura saņemti radiolokācijas profilēšanas laikā ierakstītajā radarogrammā identificētie atstarojumi, tika noteikts tikai, izmantojot dziļuma intervāla metodi (2.3.10. nodaļa).

#### 4.5.2. Ģeoloģisko pētījumu rezultāti un identificēto atstarojumu interpretācija

Pētījuma gaitā uz radiolokācijas profila Ragana-1 tika izvietoti divi urbumi. Pirmajā urbumā (U. 1.) purva gultne tika sasniegta 4,5 m dziļumā savukārt, otrajā urbumā (U. 2.) 4,85 m dziļumā (4.25. attēls). Abos urbumos tika konstatēts, ka purva gultni veido aleirītisks māls ar organiskās vielas piejaukumu.

Laboratoriski analizējot no ierīkotajiem urbumiem iegūtos kūdras paraugus, tika konstatēts, ka virs purva gultnes iegūļ aptuveni 0,3 m biezs zemā tipa kūdras slānis. Minēto slāni kopumā veido niedru kūdra, bet tā pamatni veido koku zāļu un koku kūdra. Slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe ir aptuveni 40% (4.25. attēls).

Tālāk zemā tipa kūdras slāni pārsedz aptuveni vienu metru biezs pārejas tipa kūdras slānis, ko veido koku sfāgnu un koku kūdra. Aprakstītajam slānim raksturīga visai mainīga kūdras sadalīšanās pakāpe (4.25. attēls).



4.25. attēls. Kūdras īpašību izmaiņas Raganu purva ģeoloģiskajā griezumā pie 1. un 2. urbuma

Apzīmējumi: 1 – mitruma daudzums; 2 – pelnainība; 3 – kūdras sadalīšanās pakāpe; 4 – purva gultne; 5 – atstarojuma numurs; 6 – dziļuma intervāls, no kura saņemts atstarojums.

Figure 4.25. Changes of peat properties in geological section of Raganu bog at boreholes 1 and 2

Legend: 1 – moisture content; 2 – ash content; 3 – degree of peat decomposition; 4 – mineral bed of the bog; 5 – number of reflection; 6 – depth interval of reflection.

Purva virsējo slāni veido 2,2 m biezs augstā tipa kūdras slānis. Augstā tipa kūdras slāni pamatā veido fuskuma sfāgnu kūdra, taču ir sastopama arī spilvju sfāgnu un magelānsfāgnu kūdra. Slānim raksturīgā kūdras sadalīšanās pakāpe slāņa apakšējā daļā ir aptuveni 15%, savukārt slāņa virsējā daļā sastopams starpslānis, kuram raksturīgā sadalīšanās pakāpe ir lielāka par 30% (4.25. attēls).

Pie 1. urbuma radarogrammā Ragana-1 1. atstarojums tika saņemts pēc 259 ns, savukārt pie 2. urbuma 1. atstarojums tika saņemts pēc 270 ns. Ņemot vērā to, ka no visiem

identificētajiem atstarojumiem šis atstarojums ierakstītajā radarogrammā ir reģistrēts pēc vislielākā laika intervāla, tas tika sasaistīts ar purva gultni. Atzīmējams, ka, izmantojot dziļumu, kurā tika identificēta purva gultne, un laiku, pēc kura saņemts 1. atstarojums, pie 1. urbuma tika aprēķināts, ka kūdrai raksturīgā  $\varepsilon$  ir vienāda ar 74,66, savukārt pie 2. urbuma  $\varepsilon$  ir vienāda ar 69,7. Iegūtās vērtības uzskatāmas par tipiskām un kūdrai atbilstošām (1.1.2. nodaļa), tādējādi 1. atstarojuma saistība ar purva gultni ir ticama.

Būtiski, ka pirmā 1. atstarojuma raksturojums norāda uz tā saistību ar pakāpeniskām elektromagnētisko īpašību izmaiņām pētītajā ģeoloģiskajā griezumā (4.5.1. nodaļa), savukārt ievāktu nogulumu paraugu mitruma daudzuma analīžu rezultāti norāda uz pakāpenisku mitruma daudzuma samazināšanos virzienā uz leju kūdrai pagulošajā māla slānī. Minētais norāda uz to, ka zona ar vairākiem atstarojumiem, kas tika izdalīta kā 1. atstarojums, ir saistāma ne tikai ar purva gultni, bet arī ar mitruma daudzuma izmaiņām purvam pagulošā māla slāņa virskārtā.

Tālāk dziļuma intervālā, no kura saņemts 2. atstarojums, pie 1. urbuma vērojama robeža starp kūdras slāņiem ar atšķirīgu sadalīšanās pakāpi (4.25. attēls). Ņemot vērā to, ka nav pieejama informācija par kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām pie 2. urbuma, nav iespējams raksturot kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas laterālā virzienā. Minētais neļauj viennozīmīgi sasaistīt 2. atstarojumu ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām, taču iegūtie rezultāti liecina par iespējamu to saistību.

Atzīmējams, ka dziļuma intervālā, no kura saņemts 2. atstarojums, pie 2. urbuma vērojama mitruma daudzuma samazināšanās par aptuveni 3%, bet pie 1. urbuma dziļuma intervālā, no kura saņemts 2. atstarojums, mitruma daudzuma izmaiņas nav novērojamas (4.25. attēls). Rezultātā ir izslēgta 2. atstarojuma saistība ar mitruma daudzuma izmaiņām pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā.

Līdzīgi kā gadījumā ar 2. Atstarojumu, arī 3. atstarojumu nav iespējams saistīt ne ar mitruma daudzuma, ne pelnainības izmaiņām pētījumu teritorijas ģeoloģiskajā griezumā (4.25. attēls). Savukārt pie 1. urbuma tieši virs dziļuma intervāla, no kura saņemts 3. atstarojums, vērojams šaurs kūdras slānis ar augstāku sadalīšanās pakāpi nekā to ietverošajiem kūdras slāņiem. Ņemot vērā to, ka precīza laika, pēc kura saņemts 1. atstarojums, noteikšana bija apgrūtināta, aprēķinātie dziļuma intervāli, no kuriem saņemti atstarojumi, var būt neprecīzi. Sekojoši 3. atstarojums tika saistīts ar izdalīto šauro kūdras slāni, kam raksturīga salīdzinoši augstāka sadalīšanās pakāpe, neskatoties uz to, ka minētais slānis neietilpst aprēķinātajā dziļuma intervālā, no kura ir ticis saņemts 3. atstarojums. Līdzīgi kā gadījumā ar 2. atstarojumu, arī 3. atstarojumu nav iespējams viennozīmīgi saistīt ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām, jo nav pieejama informācija par kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām pie 2. urbuma.

Pie 1. urbuma aptuveni viena metra dziļumā vērojams kūdras slānis, kam raksturīgā sadalīšanās pakāpe ir aptuveni par 15% augstāka nekā to ietverošajiem slāņiem (4.25. attēls). Izdalītā kūdras slāņa augšējā robeža ieguļ dziļumā, kurš ietilpst intervālā, no kura saņemts 5. atstarojums, savukārt tā apakšējā robeža ieguļ dziļumā, kurš ietilpst intervālā, no kura saņemts 4. atstarojums. Iepriekš minētais liecina par to, ka 4. un 5. atstarojums ir saistāmi ar izdalītā kūdras slāņa robežām. Līdzīgi kā gadījumā ar 2. un 3. Atstarojumu, arī 4. un 5. atstarojumu nav iespējams viennozīmīgi saistīt ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām, jo nav pieejama informācija par kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām pie 2. urbuma.

## 5. Diskusija

Disertācijas izstrādes gaitā tika pievērsta uzmanība jautājumiem, kas saistīti ar purvu nogulumu pētījumos pielietoto radiolokācijas mērījumu metodiku un datu apstrādes metodiku, kā arī purvu nogulumu pētījumos identificēto radiolokācijas signāla atstarojumu interpretāciju. Tā ir ļoti plaša jautājumu grupa, daļu no kuriem iecerēts pētīt nākotnē, bet turpmāk tiks apskatīti tie jautājumi, kuri ļauj paveikto pētījumu apjomu uzskatīt par noslēgtu un pabeigtu pētījumu.

### 5.1. Purvu pētījumos pielietoto radiolokācijas pētījumu metodikas aspekti

Apskatot identificētos ģeoradara signāla atstarojumus, disertācijas izstrādes gaitā uzmanība tika pievērsta to amplitūdai un iespējam atstarojumu izsekot laterālā virzienā. Šāda pieeja tiek izmantota vairumā radiolokācijas pētījumu, kuros tiek izmantotas antenu sistēmas, kas radiolokācijas profilēšanas laikā atrodas ciešā kontaktā ar zemes virsmu (Jol, 2009). Atzīmējams, ka disertācijas izstrādes gaitā ierakstītajās radarogrammās identificēto atstarojumu amplitūdu raksturojums bija relatīvs. Proti, šī pētījuma gaitā izmantotā ģeoradara komplektācija neļauj novērtēt saņemto atstarojumu absolūto amplitūdu, jo zemes virskārtas īpašības ietekmē to ģeoradara antenas izstaroto enerģiju, kas tiek starota virzienā uz leju (2.2. nodaļa). Minētais būtiski ierobežo atšķirīgos purvos un pat vienā purvā iegūto atstarojumu amplitūdu kvantitatīvu salīdzināšanu. Sekojoši pašreizējā pētījumu posmā un ar izmantoto tehnoloģisko aprīkojumu nav bijis iespējams kvantitatīvi analizēt izstarotā ģeoradara amplitūdas zudumus izplatoties kūdrā un atsevišķu robežu kontrastainumu. Tādēļ nākotnē būtu nepieciešams izstrādāt paņēmienus, ar kuru palīdzību būtu iespējama vismaz aptuvena iegūto atstarojumu amplitūdu kvantitatīva novērtēšana, jo tas palielinās informācijas daudzumu par nogulumu elektromagnētiskajām īpašībām, ko ir iespējams iegūt ar radiolokācijas metodi.

Nereti, lai iegūtu papildus informāciju par pētīto ģeoloģisko griezumumu, tiek analizēta identificēto ģeoradara signāla atstarojumu fāze (Izyumov et al., 2008). Tas ir, ja saņemtais ģeoradara signāla atstarojums ir vienā fāzē ar tiešo ģeoradara signālu, ar atstarojumu saistītajai robežai pagulošajam nogulumu slānim ir raksturīgs lielāks elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums nekā uzgulošajam nogulumu slānim (1.1.4. nodaļa). Šāda pieeja nereti tiek izmantota, lai identificētu atstarojumu, kas ir saistāms ar gruntsūdens virsmu (Izyumov et al., 2008).

Disertācijas izstrādes gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi, identificēto atstarojumu fāzes noteikšana ir neviennozīmīga. Proti, ar atšķirīgu kūdras slāņu robežām saistītie atstarojumi ir identificējami kā salīdzinoši plata zona ar vairākiem signāliem nevis, kā viens izteikts, pusotru periodu garš atstarojums (4. nodaļa). Sekojoši šādiem atstarojumiem fāzi noteikt nav iespējams. Nereti viennozīmīgi noteikt fāzi nav iespējams pat atstarojumiem, kas saistāmi ar purva gultni (Laugas purvs un Raganu purvs). Minētais norāda uz to, ka fāzes noteikšana atstarojumiem, kas saistāmi ar kūdras slāņu robežām, ir neviennozīmīga. Tādējādi uzskatāms, ka turpmākos purvu nogulumu pētījumos fāzes noteikšana konkrētiem atstarojumiem nevar tikt izmantota kā standarta risinājums ar kura palīdzību ir iespējams iegūt papildus informāciju par purva ģeoloģisko griezumumu.

Autora pētījuma sākumposmā, izmantojot galvenokārt Cenas tīrelī iegūtos rezultātus, tika izvēlēta antenu sistēma, kas tiks pamatā izmantota radiolokācijas mērījumu veikšanai pētījuma gaitā (2.3.2. nodaļa). Antenu sistēmu salīdzināšanas gaitā tika noteikts, ka 300 MHz antenu sistēma ir piemērotākā purvu pētījumiem. Līdzīgs viedoklis tiek pausts

arī zinātniskajās publikācijās, kurās aprakstīti purvu pētījumi ar radiolokācijas metodi – purvu pētījumos efektīvākās ir antenu sistēmas, kuru frekvence ir tuva 200 MHz (Sass et al., 2010; Leopold, Volkel, 2003; Holden et al., 2002; Slater, Reeve, 2002). Atzīmējams, ka šī pētījuma gaitā, izmantojot 300 MHz antenu sistēmu, faktiski tika saņemti atstarojumi, kuru centrālā frekvence bija tuva 120 MHz (Karušs, Bērziņš, In press). Aprēķinot iegūto mērījumu telpisko izšķirtspēju, ir jāizmanto tieši faktisko saņemto atstarojumu centrālo frekvenci (1.2.3. nodaļa) nevis nominālo antenu sistēmas centrālo frekvenci. Atzīmējams, ka, neskatoties uz nelielajām faktisko centrālo frekvenču atšķirībām starp atstarojumiem, kas tika iegūti ar 100 MHz un 300 MHz antenu sistēmām, radarogramma, kas Makinu purvā tika iegūta ar 300 MHz antenu sistēmu (4.14. attēls; 1. atstarojums), sniedz detalizētāku informāciju par purva ģeoloģisko griezumam nekā radarogramma, kas Makinu purvā tika iegūta ar 100 MHz antenu sistēmu (2.7. attēls; 1. atstarojums). Minētais norāda uz to, ka pat nelielas atšķirības antenu sistēmas centrālajā frekvencē ievērojami ietekmē iegūto mērījumu telpisko izšķirtspēju.

Pētījumos, kuros izmantotas antenu sistēmas ar centrālo frekvenci, kas tuva 200 MHz, izpētes dziļums variē intervālā no četrus metrus dziļuma (Plado et al., 2011) līdz sešiem metriem dziļumam (Parsekian et al., 2011). Savukārt disertācijas izstrādes gaitā veiktā pētījumā iegūtie rezultāti liecina par to, ka, pielietojot 300 MHz antenu sistēmu, maksimālais izpētes dziļums kūdrā ir tuvs 6,5 m (4.14. attēls; 4.3.2. nodaļa). Tādējādi sagaidāms, ka turpmākos purvu pētījumos ar 300 MHz antenu sistēmu būs iespējams iegūt ģeoradara signāla atstarojums vismaz no 5 – 6 m dziļuma. Atzīmējams, ka maksimālo izpētes dziļumu, ko var sasniegt ar izvēlēto antenu sistēmu, ietekmē gan izvēlētais ģeoradara iekārtas raidītā impulsa amplitūda, gan pētījumu teritorijā sastopamo nogulumu slāņu elektromagnētiskās īpašības (1.1.1. nodaļa), gan zemes virskārtas īpašības (2.2. nodaļa), kas ievērojami sarežģī maksimālā izpētes dziļuma prognozēšanu.

Veicot radiolokācijas pētījumus purvos, ierakstītajās radarogrammās identificētie atstarojumi salīdzinoši bieži tiek sasaistīti ar purva ģeoloģiskajā griezumā identificētajām robežām, nepastarpināti izmantojot pētījumu teritorijā veiktos urbumus (Oliveira et al., 2012; Van Bellen et al., 2011; Comas et al., 2005a; Slater, Reeve, 2002). Tas ir, netiek veikti tieši ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumi kūdrā pētījumu teritorijā.

Izmantojot šādu pieeju, iegūto rezultātu interpretācijas atbilstība patiesajai situācijai ir principiāli atkarīga no tā, vai pētījuma autoriem ir izdevies identificēt atstarojumu, kas saistāms ar purva gultni. Iepriekš minētais saistīts ar to, ka šādā gadījumā pāreja no laika griezuma uz dziļuma griezumam ierakstītajās radarogrammās tiek veikta, izmantojot vidējo ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums kūdrā, kas savukārt ir noteikts, izmantojot urbumos identificēto purva gultnes dziļumu un laiku, pēc kura saņemts atstarojums, kas saistāms ar purva gultni (1.3.1. nodaļa). Vairumā gadījumu ar purva gultni tiek sasaistīts ģeoradara signāla atstarojums, kas ir saņemts pēc vislielākā laika.

Šī pētījuma gaitā Dzelves purvā iegūtie rezultāti liecina par to, ka šāda pieeja iegūto datu interpretācijai var izraisīt rupjas kļūdas, jo ne visos gadījumos ir iespējams viennozīmīgi noteikt, kurš no ierakstītajā radarogrammā identificētajiem atstarojumiem ir saistāms ar purva gultni (4.2. nodaļa). Daudzos gadījumos ir iespējama salīdzinoši veiksmīga atstarojuma, kas saistāms ar purva gultni, identificēšana (piemēram Cenas tīrelī; 4.1. nodaļa), taču turpmākos līdzīga rakstura pētījumos būtu ieteicams obligāti veikt tiešus ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumus kūdrā, lai būtu iespējams viennozīmīgi identificēt atstarojumu, kas saistāms ar purva gultni.

Nereti ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumi tiek veikti tikai līdz purva gultnei (Comas et al., 2011b; Comas et al., 2005a), sekojoši dziļums, no kura ir saņemti pārējie identificētie atstarojumi, tiek aprēķināts, izmantojot vienu ātruma vērtību, kas faktiski ir vidējā svērtā ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtība purva ģeoloģiskajā

griezumā. Veiktais pētījums norāda, ka šāda pieeja attaisno sevi gadījumos, kad nav nepieciešams iegūt precīzus dziļuma, no kura saņemti identificētie atstarojumi, mērījumus, jo elektromagnētisko viļņu izplatīšanās ātrums dažādos kūdras slāņos, pat atšķirīgos purvos ir salīdzinoši līdzīgs (1.1.2. nodaļa; Lowry et al., 2009). Tomēr pētījumos, kuru mērķis ir noteikt to, kuras nogulumu īpašības ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanos un var izraisīt ģeoradara signāla atstarojumus, dziļumu, no kura ir saņemti ģeoradara signāla atstarojumi, ir jānosaka pēc iespējas precīzāk. Pretējā gadījumā var veidoties maldīgs priekšstats par patiesajiem atstarojumu iemesliem. Rezultātā šāda veida pētījumos ir ieteicams veikt tiešus ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumus līdz visām atstarotālvirsmām, kas ir izraisījušas identificētos atstarojumus.

Minēto apstiprina Cenas tīrelī iegūtie rezultāti (4.6. un 4.7. attēls) – 5 atstarojuma saistība ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām tika izslēgta, jo aprēķinātais dziļums, no kura tika saņemts 5. atstarojums pie trešā urbuma, par 30 cm atšķīrās no dziļuma, kurā tika identificētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas. Gadījumā, ja iegūto mērījumu interpretācijas gaitā tiktu izmantots vidējais ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums purva ģeoloģiskajā griezumā, šādu nesakrītību nebūtu iespējams identificēt. Līdzīgi Raganu purvā identificēto ģeoradara signāla atstarojumu sasaiste ar pētījumu teritorijā ierīkotajos urbumos identificētajām kūdras īpašību izmaiņām bija neviennozīmīga, jo pētījumu objektā neizdevās iegūt kvalitatīvu CMP mērījumu radarogrammu (4.5.1. nodaļa).

Autora pētījuma gaitā ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums tika noteikts, izmantojot CMP metodi (2.3.9. nodaļa). Arī vairākos līdzīga rakstura pētījumos ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumi ir veikti izmantojot tieši CMP metodi (Comas et al., 2011b; Mustgrave, Binley, 2011; Lowry et al., 2009). Taču viedokļi par metodes precizitāti ir atšķirīgi. Tā, piemēram, atsevišķās zinātniskajās monogrāfijās, kas veltītas radiolokācijas metodes problemātikai, tiek pausts viedoklis, ka, izmantojot CMP metodi, iegūtās ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma vērtības atšķiras no patiesajām par aptuveni 10% (Jol, 2009). Savukārt zinātniskajās publikācijās, kur aprakstīti purvu pētījumi ar radiolokācijas metodi, CMP mērījumi nereti tiek izmantoti augstas precizitātes aprēķinos (piemēram, lai aprēķinātu nogulumu fāzu tilpuma daļu attiecības; Comas et al., 2011a; Parsekian et al., 2011; Parsekian et al., 2010; Strack, Mierau, 2010).

Promocijas darba pētījuma gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka CMP metode kūdras purvu pētījumos kopumā ir uzskatāma par salīdzinoši efektīvu un precīzu. Tā, piemēram, Cenas tīrelī (4.1.2. nodaļa), izmantojot CMP mērījumus, aprēķinātais dziļums, kādā iegūļ purva gultne atšķīrās no urbumos identificētā ne vairāk kā par sešiem centimetriem (aptuveni 1,5% no faktiskā purva dziļuma). Savukārt Dzelves purvā (4.2.2. nodaļa) ne vairāk kā par trīs centimetriem. Kā redzams, izmantojot CMP mērījumus, ir iespējams aprēķināt dziļumu, kādā iegūļ nogulumu slāņu robeža ar precizitāti, kas ir salīdzināma ar ģeoloģisko urbumu dziļuma precizitāti. Tomēr atzīmējams, ka Laugas purvā, izmantojot CMP mērījumus, aprēķinātais dziļums, kādā iegūļ purva gultne, atšķīrās no urbumos identificētā par aptuveni 20 cm (4.4.2. nodaļa). Līdzīgi problemātiska bija ar purva gultni saistītā atstarojuma identificēšana arī Makinu purvā, kur varbūtējā CMP mērījumu kļūda bija tuva 20 cm (4.3.2. nodaļa). Abos minētajos purvos CMP mērījumi tika veikti, izmantojot antenu sistēmu ar salīdzinoši zemu centrālo frekvenci (100 MHz; 2.3.9. nodaļa). Minētais, iespējams, izraisīja salīdzinoši lielās neprecizitātes, taču kopumā jāatzīmē, ka šī pētījuma gaitā neizdevās noskaidrot viennozīmīgi pamatotu iemeslu minētajām neprecizitātēm.

Atsevišķi izdalāms Raganu purvs, kurā neizdevās iegūt tālākiem ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma aprēķiniem izmantojamus augstvērtīgus CMP mērījumus, neskatoties uz to, ka purva biezums bija tikai 4,5 m (4.5.1. nodaļa). Atstarojumus CMP mērījumu gaitā iegūtajā radarogrammā salīdzinoši lielo signāla zudumu dēļ bija iespējams identificēt tikai

uz atsevišķiem zondējumiem, kuri tika ierakstīti, antenu savstarpējam attālumam nepārsniedzot vienu metru (4.24. attēls). Lielie ģeoradara signāla zudumi, iespējams, ir skaidrojami ar paaugstinātu purva ūdeņu elektrovadītspēju (1.1.1. nodaļa), kas saistāma ar to, ka purva ziemeļu daļā no Devona slāņiem purva virskārtā izplūst sērūdeņu avoti (3.5. nodaļa).

Kopumā atzīmējams, ka turpmākos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi būtu jāveic tieši ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma mērījumi kūdras slāņos. Salīdzinoši veiksmīgi šādus mērījumus ir iespējams veikt ar CMP metodi, taču šī pētījuma gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka, to izmantojot, ne vienmēr ir iespējams sasniegt precizitāti, kas atbilstu tiešu ģeoloģisko mērījumu precizitātei, kā arī šī metode nav universāli pielietojama visos gadījumos.

Šī pētījuma gaitā laiks, pēc kura ir ticis saņemts ģeoradara signāla atstarojums, tika noteikts, pielietojot datorprogrammu MS Excell (2.3.8. nodaļa). Pie katra no ierīkotajiem urbumiem laiks, pēc kura saņemts identificētais atstarojums, tika noteikts uz 10 zondējumiem, izmantojot datu attēlošanu MS Excell datorprogrammā. Šī pētījuma gaitā tika konstatēts, ka šāda pieeja ir efektīva tikai atsevišķos gadījumos, jo vairumu no ierakstītajās radarogrammās identificētajiem atstarojumiem veido zona ar vairākiem signāliem, nevis viens izteikts, pusotru periodu garš atstarojums (piemēram 4.1. attēlā, 5. un 6. atstarojums; 4.14. attēlā, 3., 4. un 5. atstarojums). Kā izņēmums ir minami atstarojumi, kas saistāmi ar purva gultni (4.1. attēls, 1. atstarojums). Savukārt, apskatot CMP mērījumu laikā iegūtās radarogrammas, šāda datu attēlošanas un analizēšanas metodika ir vērtējama par efektīvu, jo šī pētījuma gaitā dziļuma, no kura ir saņemts kāds konkrēts atstarojums, aprēķinu precizitāte tika sasniegta, izmantojot zondējumu attēlošanu un analīzi izklājlapu datorprogrammā. Sekojoši turpmākos pētījumos laiku, pēc kura ir saņemts ģeoradara signāla atstarojums, ir lietderīgi noteikt, pielietojot datu attēlošanu, izklājlapu datorprogrammā analizējot tikai CMP mērījumu laikā iegūto radarogrammu.

Lai sasaistītu pētījumu gaitā ierakstītajās radarogrammās identificētos atstarojumus ar pētījumu teritorijas ģeoloģisko griezumus, visbiežāk tiek izmantoti ģeoloģiskie urbumi. Kopumā jāatzīmē, ka nereti urbumi tiek izvietoti salīdzinoši tālu viens no otra pat tādos gadījumos, kad pētījuma mērķis ir noskaidrot kūdras īpašības, kas ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanos (Plado et al., 2011; Slater, Reeve, 2002). Iepriekšējo pētījumu autoru izvēlētais urbumu savstarpējais attālums ir tuvs un bieži vien pārsniedz 100 m (ibid.).

Šī pētījuma sākumā tika izvēlēts ierīkot divus urbumus uz katra izvēlētā radiolokācijas profila (2.4.1. nodaļa, 4. nodaļa), kas, ņemot vērā to, ka radiolokācijas pētniecības profilu garums bija vidēji 45 m, vērtējams kā neliels attālums salīdzinoši ar tradicionāli purvu pētījumos izvēlētajiem urbumu savstarpējiem attālumiem (Plado et al., 2011; Lowry et al., 2009). Taču šī pētījuma gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka pat šāds, salīdzinoši biežs urbumu izvietojums nav optimāls gadījumos, ja pētījuma mērķis ir noskaidrot kūdras īpašības, kas ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanos (4.1. nodaļa). Ņemot vērā to, ka tādai kūdras īpašībai kā mitruma daudzums ir salīdzinoši liela laterālā mainība (4.8., 4.16. un 4.20. attēls), lai būtu iespējams veikt viennozīmīgu iegūto mērījumu interpretāciju, līdzīga rakstura pētījumos būtu ieteicams ierīkot regulāru urbumu tīklu ar savstarpējo attālumu, kas nepārsniedz piecus metrus. Tāpat šāds regulārs urbumu izvietojums atvieglotu lokālu kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņu atšķiršanu no laterālā virzienā izturētiem kūdras slāņiem ar atšķirīgu sadalīšanās pakāpi.

Šī pētījuma sākumā tika izstrādāts jauns paņēmieni, ar kuru palīdzību, ir iespējams noteikt to dziļuma intervālu, no kura ir ticis saņemts ģeoradara signāla atstarojums (2.3.10. nodaļa). Autora pētījuma gaitā tika konstatēts, ka metode ir veiksmīgi izmantojama, lai novērtētu kādas konkrētas nogulumu īpašību robežas iespējamu saistību

ar identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem. Tādējādi turpmākos pētījumos izstrādātais paņēmieni ir pielietojams iegūto radiolokācijas mērījumu interpretācijas gaitā, lai ierobežotu dziļuma intervālu, no kura identificētie atstarojumi varētu būt saņemti. Vienlaikus atzīmējams, ka gadījumā, ja atstarojums, kas saistāms ar purva gultni, ir neizteikts, piedāvātais risinājums nebūs efektīvs.

## 5.2. Radiolokācijas mērījumu interpretācijas jautājumi

Kopumā disertācijas izstrādes gaitā tika apsekots 21 purvs (2.2. attēls), no kuriem tikai piecos tika identificētas vietas, kas atbilstu šī pētījuma sākumā izvirzītajiem kritērijiem (2.2. nodaļa). Pie tam lielākajā daļā no gadījumiem purvs neatbilda kritērijiem, jo ierakstītajā radarogrammā nebija iespējams identificēt nevienu izteiktu subhorizontālu atstarojumu, kas būtu saistāms ar robežu starp diviem kūdras slāņiem.

Atzīmējams, ka vairumā gadījumu no līdzīga rakstura pētījumiem (Kettridge et al., 2012; Plado et al., 2011; Kettridge et al., 2008; Comas et al., 2004) tāpat ierakstītajās radarogrammās nav identificējami izteikti subhorizontāli atstarojumu, kas būtu saistāms ar robežu starp diviem kūdras slāņiem. Minētais norāda uz to, ka kūdrai kopumā ir raksturīga maza to elektromagnētisko īpašību mainība atkarībā no tās fizikālajām īpašībām, jo visos minētajos gadījumos (ibid.) purvos ir tikušas identificētas izmaiņas vismaz vienā no kūdras fizikālajām īpašībām (botāniskais sastāvs, sadalīšanās pakāpe, mitruma daudzums). Tāpat šāda izteiktu subhorizontālu atstarojumu neesamība liecina par to, ka tikai retos gadījumos robežas starp kūdras slāņiem ar atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām ir krasas un laterālā virzienā izturētas.

Iepriekš minēto apstiprina līdzīga rakstura pētījumi (Sass et al., 2010; Holden et al., 2002), kā arī disertācijas autora pētījuma gaitā ierakstītās radarogrammas. Tā tika konstatēts, ka vairumu no identificētajiem atstarojumiem, kas saistāmi ar robežām starp kūdras slāņiem ar atšķirīgām elektromagnētiskajām robežām, veido salīdzinoši platas, vietām neizturētas signālu zonas (piemēram 4.1. attēlā, 5. un 6. atstarojums; 4.14. attēlā, 3., 4. un 5. atstarojums; 4.17. attēls, 2. un 3. signāls).

Ņemot vērā to, ka ģeoradara signāla atstarojumi ir saistīti ar nogulumu īpašību izmaiņām (1.1.4. nodaļa), ir jānosaka ne tikai nepieciešamo izmaiņu lielums, bet arī tas cik krasas ir izmaiņas. Proti, cik šaurā intervālā izmaiņām ir jānotiek, lai tās izraisītu ar ģeoradara uztvērējantenu reģistrējamu ģeoradara signāla atstarojumu. Zinātniskajās monogrāfijās, kas veltītas radiolokācijas problemātikai, nereti tiek minēts, ka, ja nogulumu īpašību izmaiņas ir pakāpeniskas un kopumā intervāls, kuru tās pārklāj, ir platāks par vienu ceturto daļu no izstarotā ģeoradara signāla centrālās frekvences viļņa garuma, tās neizraisīs ģeoradara signāla atstarojumu (Izyumov et al., 2008).

Šī pētījuma gaitā tika izmantota antenu sistēma, kuras faktiskā centrālā frekvence bija aptuveni 120 MHz (Karušs, Bērziņš, In press). Cena's tīrelī noteiktā vidējā  $\epsilon$  vērtība bija aptuveni 73 (4.1., 4.2. un 4.3. tabula), sekojoši ceturtdaļa no izstarotā 120 MHz ģeoradara signāla ir vienāda ar septiņiem centimetriem. Tādējādi ģeoradara signāla atstarojums netiktu reģistrēts, ja nogulumu īpašību izmaiņas notiktu intervālā, kas pārsniedz septiņus centimetrus. Tomēr iegūto rezultātu interpretācijas gaitā radarogrammā Cena-u identificētais 4. atstarojums tika sasaistīts ar mitruma daudzuma izmaiņām ģeoloģiskajā griezumā (4.1.2. nodaļa), kas pie atsevišķiem urbumiem ir izplatīts intervālā, kas pārsniedz 15 cm (6., 8. un 9. urbuma; 4.8. attēls), kas ir gandrīz 2 reizes lielāks nekā ceturtdaļa no izstarotā ģeoradara signāla. Līdzīgi novērojumi tika konstatēti arī Dzelves purvā (3. atstarojums; 4.13. attēls), kur mitruma daudzuma izmaiņas ir izplatītas intervālā, kas ir tuvs 10 cm (ceturtdaļa no ģeoradara signāla viļņa garuma tāpat ir septiņi centimetri



(4.4. tabula)). Atzīmējams, ka abos gadījumos nav izslēgta identificētā atstarojumu saistība ne tikai ar mitruma daudzuma izmaiņām, bet arī ar sadalīšanās pakāpes izmaiņām, tomēr arī sadalīšanās pakāpes izmaiņas minētajos gadījumos ir salīdzinoši pakāpeniskas (4.6., 4.7. un 4.13. attēls). Sekojoši, šī pētījuma gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka, lai notiktu ģeoadara signāla atstarošanās, nogulumu īpašību izmaiņas var būt arī salīdzinoši pakāpeniskas un šo pārmaiņu dziļuma intervāls ģeoloģiskajā griezumā (izplatības intervāls) var pārsniegt ceturto daļu no izstarotā signāla viļņa garuma.

Atsevišķās publikācijās pētījumu autori ir veiksmīgi demonstrējuši, ka radiolokācijas metodi ir iespējams izmantot, lai raksturotu purva gultni veidojošos nogulumus (Comas et al., 2004; Comas et al., 2005a).

Līdzīgi autora pētījuma gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka, analizējot ar purva gultni saistīto atstarojumu, ir iespējams prognozēt purva gultni veidojošo nogulumu īpašības. Tā, piemēram, gadījumos, kad purva gultni veido smiltis, kā Cenas tīrelī (4.1.2. nodaļa) un Dzelves purvā (4.2.2. nodaļa), ar purva gultni saistītais atstarojums ir izteikts un to veido pusotrs signāla periods (4.1. attēls un 4.10. attēls). Savukārt gadījumos, kad purva gultni veido mālaini (Raganu purvs, 4.5.2. nodaļa) vai aleirītiski nogulumi ar organiskās vielas piejaukumu (Laugas purvs, 4.4.2. nodaļa), ar purva gultni ir saistāms nevis viens izteikts atstarojums, bet gan atstarojumu zona (4.17. un 4.23. attēls). Minētais liecina par to, ka mālainu nogulumu elektromagnētiskās īpašības varētu būt līdzīgākas kūdras elektromagnētiskajām īpašībām nekā smilšainu nogulumu elektromagnētiskās īpašības un to ka zem purva paguloša smalkgraudainu nogulumu slāņa virsējā daļā vērojamas pakāpeniskas to elektromagnētisko īpašību izmaiņas.

Līdzšinēji veiktajos purvu nogulumu pētījumos ar radiolokācijas metodi identificēt atstarojumu no robežas starp kūdras slāni un sapropeļa slāni ir izdevies ar mainīgām sekmēm. Tā, piemēram, Komasa (Comas et al., 2004) ierakstītajās radarogrammās nav vērojams izteikts atstarojums, kas būtu saistāms ar robežu starp kūdras slāni un sapropeļa slāni. Pētījuma autori ir norādījuši, ka robežai atbilstošajā dziļumā ir vērojamas izmaiņas atsevišķo lokālo atstarojumu īpašībās, un rezultātā ir iespējams identificēt minēto robežu, taču publicētie pētījuma rezultāti nepārliciecināši pamato izvirzīto hipotēzi. Tomēr tajā pašā purvā turpmākos pētījumos ir ierakstītas radarogrammas, kurās ir iespējams identificēt izteiktu atstarojumu, kas saistāms ar robežu starp kūdras slāni un sapropeļa slāni (Comas et al., 2005a). Tāpat Lovrijam (Lowry et al., 2009) ir izdevies identificēt atstarojumu, kas būtu saistāms ar robežu starp kūdras slāni un sapropeļa slāni. Atzīmējams, ka publicētajās radarogrammās minētā atstarojuma identificēšana ir apgrūtināta, kas, iespējams, ir skaidrojams ar salīdzinoši neveiksmīgi izvēlēto radiolokācijas datu attēlojumu (Lowry et al., 2009). Atzīmējams ir pētījums, ko Sleiters un Rīvs (Slater, Reeve, 2002) ir veikuši Caribou purvā, kur ierakstītajās radarogrammās ir iespējams viennozīmīgi identificēt izteiktu atstarojumu no robežas starp kūdras slāni un sapropeļa slāni. Taču minētā pētījuma rezultāti neļauj izdarīt secinājumus par to, cik kontrastaina ir robeža starp kūdras un sapropeli, jo apskatītajā purvā tieši virs sapropeļa slāņa iegul plāns aleirīta slānītis, kas, domājams, būtiski ietekmēja saņemtajā atstarojuma amplitūdu.

Divos no purviem, kuros disertācijas izstrādes gaitā tika veikti detalizēti pētījumi, purva ģeoloģiskajā griezumā tika identificēts sapropeļa slānis (Makinu purvs, 4.3.2. nodaļa un Laugas purvs, 4.4.2. nodaļa). Makinu purvā iegūtie rezultāti neļauj izdarīt viennozīmīgus secinājumus par to, vai identificētais sapropeļa slānis ir izraisījis atstarojumu (4.3.2. nodaļa). Tas ir, virs purva gultnes iegul aptuveni 10 cm biezs sapropeļa slānis, savukārt ierakstītajā radarogrammā no dziļuma, kas aptuveni atbilst purva gultnes dziļumam, ir saņemti divi atstarojumi (4.14. attēls, 1. atstarojums). Aprēķinot dziļumu, no kura ir tikuši saņemti minētie atstarojumi, tika konstatēts, ka robeža starp kūdras slāni un

sapropēja slāni nav izraisījusi ģeoradara signāla atstarojumu. Taču gadījumā, ja aprēķinātais ģeoradara signāla izplatīšanās ātrums pat nedaudz neatbilst patiesajam, ātrāk saņemtais identificētais atstarojums varētu tikt sasaistīts ar sapropēja slāņa augšējo robežu (4.3.2. nodaļa).

Analizējot Laugas purvā iegūtos radiolokācijas mērījumus, tika konstatēts, ka neviens no identificētajiem subhorizontālajiem atstarojumiem nav saistāms ar robežu starp kūdras slāni un sapropēja slāni (4.4.2. nodaļa). Atzīmējams, ka Laugas purvā, izmantojot CMP mērījumus, aprēķinātie ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumi varētu būt neprecīzi, par ko liecina aprēķinātā dziļuma, no kura saņemts atstarojums, kas saistāms ar purva gultni, nesakritība ar faktisko purva biezumu (4.22. attēls, 1. atstarojums). Ņemot vērā iepriekš minēto, nav izslēgta 2. atstarojuma saistība ar robežu starp kūdras slāni un sapropēja slāni. Taču gadījumā, ja 2. atstarojums būtu saistāms ar apskatīto robežu, kūdras slāņa vidējai e vērtībai būtu jābūt vienādai ar 43, kas ir maz ticama vērtība kūdrai (1.1.2. nodaļa). Tādējādi 2. atstarojuma saistība ar apskatīto robežu ir maz ticama.

Kopumā atzīmējams, ka Laugas purvā ierakstītajā radarogrammā dziļumā, kas atbilstu robežai starp kūdras slāni un sapropēja slāni, ir vērojami vairāki vāji atstarojumi (4.22. attēls), kas norāda uz to, ka Laugas purvā apskatītā robeža ir neizteikta attiecībā pret nogulumu elektromagnētiskajām īpašībām. To, ka Laugas purvā nav saņemts izteikts atstarojums no robežas, kas nošķir kūdras un sapropēja slāni, nav skaidrojams arī ar to, ka minētā robeža ir salīdzinoši pakāpeniska, jo, izpētot šeit izveidoto urbumu serdes, tika konstatēts, ka pāreja no salīdzinoši viendabīga sapropēja uz salīdzinoši viendabīgu kūdru ir vērojama intervālā, kas nepārsniedz 10 cm.

Šī pētījuma gaitā iegūtie rezultāti norāda uz to, ka kūdras slāņa un sapropēja slāņa robeža, kas ir uzskatāma par izteiktu ģeoloģisko robežu, iespējams, nav izteikta nogulumu elektromagnētisko īpašību robeža, kā rezultātā ar radiolokācijas metodi minētās robežas identificēšana var būt problemātiska.

Līdz šim veikto līdzīga rakstura pētījumu analīzes gaitā tika konstatēts, ka dominē viedoklis, ka kūdras elektromagnētiskās īpašības nosaka tikai tās mitruma daudzums (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Kettridge et al., 2008; Holden et al., 2002). Sekojoši, analizējot to, vai kādas kūdras īpašības izmaiņas varētu izraisīt ģeoradara signāla atstarojumu, tiek novērtēts, vai konkrētās īpašības izmaiņas ietekmē mitruma daudzumu kūdrā. Tā, piemēram, nereti iegūtie atstarojumi tiek saistīti ar slāņu, kuriem ir atšķirīgas nogulumu blīvuma vai humifikācijas pakāpes vērtības, robežām, taču kā iemesls tam, ka ir izveidojies atstarojums, tiek minētas atšķirīgas nogulumu mitruma daudzuma vērtības (Comas et al., 2011b; Plado et al., 2011; Holden et al., 2002; Slater, Reeve, 2002). Tas ir, tiek pausts viedoklis, ka atstarojuma iemesls visos gadījumos ir mitruma daudzuma izmaiņas. Balstoties uz šo viedokli, ir tikuši veikti vairāki laboratoriski eksperimenti, kuru laikā pētniekiem ir izdevies pierādīt, ka pat nelielas kūdras mitruma daudzuma izmaiņas ietekmē ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumu (Parsekian et al., 2012; Comas, Slater, 2007), kas arī ir sagaidāms, ņemot vērā to, ka ūdenim ir salīdzinoši augsta dielektriskā caurlaidība (1.1. tabula). Taču, ja iepriekš minētais viedoklis ir patiess, tad visos gadījumos, kad purva ģeoloģiskajā griezumā ir sastopamas mitruma daudzuma izmaiņas, būtu jābūt identificējamam ar tām saistītam ģeoradara signāla atstarojumam. Kas ir pretrunā ar Tolonena (Tolonen et al., 1984) veiktā pētījuma rezultātiem, kurus apkopojot, ir jāsecina, ka tikai 71% no visiem gadījumiem, kad purva ģeoloģiskajā griezumā ir identificētas mitruma izmaiņas, ir reģistrēts tām atbilstošs ģeoradara signāla atstarojums (1.3. tabula).

Autora pētījuma gaitā kopumā tika identificēti 17 atstarojumi, kas ir saistāmi ar kūdras īpašību maiņu purva ģeoloģiskajā griezumā. No tiem 9 atstarojumus ir iespējams skaidrot ar mitruma daudzuma izmaiņām, kas veido 53% no kopējo saņemto atstarojumu

skaita (4. nodaļa). Pārējos gadījumos identificētajiem ģeoradara signālu atstarojumiem atbilstošā dziļumā purva ģeoloģiskajā griezumā nebija iespējams identificēt laterālā virzienā izturētas mitruma daudzuma izmaiņas. Sekojoši, veiktā pētījuma rezultāti norāda uz to, ka nav iespējams skaidrot visus identificētos ģeoradara signāla atstarojumus, izmantojot tikai mitruma daudzuma izmaiņas purva ģeoloģiskajā griezumā. Pie tam, gadījumā, ja identificētie atstarojumi būtu skaidrojami tikai ar mitruma daudzuma izmaiņām, lai notiktu ģeoradara signāla atstarošanās, pietiktu ar mitruma daudzuma izmaiņām par trīs procentiem. Iepriekš minēto nosaka tas, ka Cenas tīrelī dziļumā, no kura tika saņemts 4. atstarojums, tika identificētas mitruma daudzuma izmaiņas par aptuveni trīs procentiem, savukārt Dzelves purvā 4. atstarojums tika saņemts no dziļuma, kurā tika identificētas mitruma daudzuma izmaiņas par aptuveni 2,5% (4.8. attēls, 4.13. attēls). Tādējādi pārējos gadījumos, kad purva ģeoloģiskajā griezumā ir tikušas identificētas mitruma daudzuma izmaiņas vismaz par trīs procentiem, ierakstītajā radarogrammā būtu jābūt reģistrētam atbilstošam atstarojumam. Taču Makinu purvā aptuveni 550 cm dziļumā ir vērojamas laterālā virzienā izturētas mitruma daudzuma izmaiņas par septiņiem procentiem, bet ierakstītajā radarogrammā atstarojums atbilstošajā dziļumā netika identificēts (4.16. attēls). Līdzīgi Laugas purvā aptuveni 400 cm dziļumā ir vērojamas laterālā virzienā izturētas mitruma daudzuma izmaiņas par četriem procentiem, tomēr ierakstītajā radarogrammā ar tām saistāms atstarojums netika identificēts (4.20. attēls).

Arī salīdzinoši problemātiski ir skaidrojamas atšķirības saņemto atstarojumu amplitūdās pie vienādām mitruma daudzuma izmaiņām. Piemēram, gan Cenas tīrelī identificētais 4. atstarojums, gan Makinu purvā identificētais 3. atstarojums ir saistāmi ar aptuveni trīs procentiem lielām mitruma daudzuma izmaiņām, taču ierakstīto atstarojumu amplitūdas būtiski atšķiras (4.3. un 4.14. attēls).

Apskatot šī pētījuma gaitā noteiktās vidējās  $\epsilon$  vērtības līdz purva gultnei, konstatējams, ka  $\epsilon$  variē intervālā no 71 līdz 74 (4. nodaļa). Atzīmējams, ka Laugas purvā noteiktā  $\epsilon$  vērtība bija vienāda ar 69 (4.6. tabula), taču aprēķinātais dziļums, no kura tika saņemts ar purva gultni saistītais atstarojums, ievērojami atšķīrās no faktiskā purva gultnes dziļumu, sekojoši Laugas purvā aprēķinātā  $\epsilon$  vērtība uzskatāma par salīdzinoši neprecīzu un netika ņemta vērā.

Vidējā mitruma vērtība purva griezumā disertācijas izstrādes gaitā pētītajos purvos ir aptuveni vienāda ar 93% (pieņemot, ka līdz viena metra dziļumam kūdras mitruma daudzums ir vienāds ar 95% (2.4.3. nodaļa)) (4. nodaļa). Persekiana (Parsekian et al., 2012) pētījumā ir publicēti detalizētu laboratorisku mērījumu rezultāti, kuros ir noteikta četros dažādos purvos iegūtu kūdras monolītu  $\epsilon$  atkarība no to mitruma daudzuma. Trijos no četriem gadījumiem nav veikti mērījumi pie 93% mitruma daudzuma, taču, izmantojot piedāvāto lineāro vienādojumu, kas apraksta dielektriskās caurlaidības atkarību no mitruma daudzuma, redzams, ka pie 93% mitruma daudzuma atbilstošajai  $\epsilon$  būtu jābūt vienādam ar aptuveni 66 (Parsekian et al., 2012). Gadījumā, kad ir tikuši veikti mērījumi pie mitruma daudzuma 93%, iegūtā  $\epsilon$  vērtība ir vienāda ar 62.

Kā redzams, Persekiana (Parsekian et al., 2012) pētījuma gaitā iegūtie rezultāti būtiski atšķiras no disertācijas izstrādes gaitā iegūtajiem rezultātiem. Piemēram, ja Cenas tīrelī pie septītā urbuma, aprēķinot dziļumu, no kura saņemts ar purva gultni saistītais atstarojums, tiktu izmantota  $\epsilon$  vērtība, kas vienāda ar 66, atšķirība starp aprēķināto un faktiskā purva biezumu būtu 22 cm, savukārt aprēķinos, izmantojot  $\epsilon$  vērtību, kas vienāda ar 62, atšķirība sasniegtu 36 cm. Jāatzīmē, ka šī pētījuma gaitā Cenas tīrelī aprēķinātais dziļums purva gultnei no faktiskā neatšķīrās vairāk kā par sešiem centimetriem ne pie viena no ierīkotajiem urbumiem (4.1.2. nodaļa). Līdzīgi Dzelves purvā, aprēķinot dziļumu, no kura saņemts ar purva gultni saistītais atstarojums, izmantojot  $\epsilon$  vērtību, kas vienāda ar 66, atšķirība starp aprēķināto un faktiskā purva biezumu būtu 25 cm, kamēr aprēķinos,

izmantojot  $\epsilon$  vērtību, kas vienāda ar 62, atšķirība sasniegtu 38 cm (vairāk kā 10 reizes lielāka neprecizitāte nekā šī pētījuma gaitā konstatētā) (4.2.2. nodaļa). Gadījumā, ja kūdras elektromagnētiskās īpašības ietekmētu tikai tās mitruma daudzums, šādas nesakritības netiktu novērotas, jo pie vienāda mitruma daudzuma būtu jābūt vienādām  $\epsilon$  vērtībām neatkarīgi no pārējām kūdras īpašībām.

Disertācijas izstrādes gaitā tika konstatēts, ka noteiktais mitruma daudzums līdz viena metra dziļumam ir mazāks par faktisko (2.4.3. nodaļa), kā rezultātā iespējams faktiskais vidējais mitruma daudzums pētīto purvu griezumā ir bijis lielāks par 93%, kas skaidrotu vērojamās nesakritības  $\epsilon$  vērtībās starp Persekiana (Parsekian et al., 2012) un disertācijas izstrādes gaitā iegūtajiem rezultātiem. Pielietojot Persekiana (Parsekian et al., 2012) publicētos vienādojumus, tika aprēķināts, ka, lai purvam raksturīgā  $\epsilon$  vērtība būtu vienāda ar 72, vidējam kūdras mitruma daudzumam disertācijā apskatītajos purvos būtu jābūt 97%. Taču pat, ja, aprēķinot vidējo mitruma daudzumu Cenas tīreļa ģeoloģiskajā griezumā, tiktu pieņemts, ka kūdras mitruma daudzums līdz viena metra dziļumam ir vienāds ar 100%, iegūtā vidējā mitruma daudzuma vērtība būtu mazāka par 95%.

Sekojoši veiktā pētījuma rezultāti viennozīmīgi liecina par to, ka kūdras elektromagnētisko īpašību izmaiņas nevar skaidrot tikai ar izmaiņām tās mitruma daudzumā.

Nereti tiek minēts, ka ģeoradara signāla atstarojumu var izraisīt izmaiņas kūdras pelnainībā (Kettridge et al., 2012; Slater, Reeve, 2002; Helleux, 1990). Purvos, kuros disertācijas izstrādes gaitā tika veikti detalizēti pētījumi, kopumā netika identificēti atsevišķi laterālā virzienā izturēti kūdras slāņi ar paaugstinātu pelnu saturu. Kā izņēmums minams kūdras slānis ar paaugstinātu pelnu saturu Dzelves purvā, kura augšējā robeža sakrīt ar dziļumu, no kura ir saņemts 3. atstarojums (4.13. attēls). Tomēr, ņemot vērā to, ka dziļumā, no kura saņemts 3. atstarojums, ir vērojamas arī salīdzinoši lielas mitruma daudzuma un kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas, nav iespējams viennozīmīgi sasaistīt minēto atstarojumu ar izmaiņām kūdras pelnainībā. Sekojoši šī pētījuma gaitā iegūtie rezultāti neļauj viennozīmīgi analizēt to, vai kūdras pelnainības izmaiņas var izraisīt reģistrējamu ģeoradara signāla atstarojumu.

Nereti kā iespējams ģeoradara signāla atstarojuma iemesls tiek minētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas (Kettridge et al., 2008; Slater, Reeve, 2002). Tolonena (Tolonen et al., 1984) apkopotie rezultāti norāda uz būtisku saistību starp kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām un identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem. Tomēr vairākos pētījumos mēģinājumi sasaistīt kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas ar identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem ir bijuši neviennozīmīgi vai pat neveiksmīgi (Plado et al., 2011; Sass et al., 2010; Kettridge et al., 2008). Atsevišķos gadījumos neveiksmes tiek skaidrotas ar to, ka pēc sadalīšanās pakāpes izdalīto kūdras slāņu biezums ir mazāks nekā izmantotās antenu sistēmas izšķirtspēja (Kettridge et al., 2008). Taču ne visos gadījumos izdalīto kūdras slāņu biezums bija mazāks par noteikto izšķirtspēju (Kettridge et al., 2008).

Visos purvos, kuros disertācijas izstrādes gaitā tika veikti detalizēti pētījumi, ģeoloģiskajā griezumā tika identificētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas. Atzīmējams, ka vairumā gadījumu (Cenas tīrelī, Dzelves purvā, Makinu purvā un Raganu purvā), no dziļuma, kurā purva ģeoloģiskajā griezumā ir tikušas identificētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas par 10 vai vairāk procentiem, ir ticis saņemts arī ģeoradara signāla atstarojums (4.1.2. nodaļa; 4.13. attēls; 4.16. attēls; 4.25. attēls), kas liecina par iespējami ciešu kūdras elektromagnētisko īpašību saistību ar kūdras sadalīšanās pakāpi. Tomēr vairākos gadījumos dziļumos, kur ir tikušas identificētas šādas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas, tika konstatētas arī citu kūdras īpašību izmaiņas. Tā, piemēram, Cenas tīrelī 4. atstarojumam atbilstošajā dziļumā ir vērojamas ne tikai sadalīšanās pakāpes izmaiņas, bet

arī mitruma daudzuma un botāniskā sastāva izmaiņas (4.1.2. nodaļa). Savukārt Dzelves purvā dziļumos, no kuriem ir saņemti 3. un 4. atstarojums, tika identificētas arī mitruma daudzuma izmaiņas (pie 3. atstarojuma arī kūdras pelnainības izmaiņas) (4.2.2. nodaļa). Līdzīgi Makinu purvā 5. atstarojumam un 2. atstarojumam atbilstošajos dziļumos ir vērojamas arī mitruma daudzuma izmaiņas (4.3.2. nodaļa).

Tāpat disertācijas izstrādes gaitā pētīto purvu ģeoloģiskajos griezumos tika identificētas izmaiņas kūdras sadalīšanās pakāpē, kuras nav izraisījušas ģeoradara signāla atstarojumu. Piemēram, Dzelves purvā ir ticis saņemts ģeoradara signāla atstarojums no kūdras slāņa ar salīdzinoši augstāku sadalīšanās pakāpi augšējās robežas, taču ne no apakšējās robežas (4.13. attēls). Arī Laugas purvā nav ticis saņemts atstarojums no dziļuma, kurā tika identificētas kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas par aptuveni astoņiem procentiem (4.22. attēls). Dzelves purvā purva virsējam slānim ir paaugstināta sadalīšanās pakāpe, bet ģeoradara signāla atstarojums no minētajām kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām nav saņemts. Atzīmējams, ka iespējams atstarojums šajā gadījumā nav saņemts, jo apskatītās sadalīšanās pakāpes izmaiņas aptuveni viena metra dziļumā ir salīdzinoši pakāpeniskas (4.13. attēls).

Apkopojot šī pētījuma gaitā iegūtos rezultātus, konstatējams, ka salīdzinoši ar publicētajiem līdzīga rakstura pētījumu rezultātiem (Plado et al., 2011; Sass et al., 2010; Kettridge et al., 2008; Slater, Reeve, 2002), disertācijas izstrādes gaitā iegūtie rezultāti norāda uz korelāciju starp sadalīšanās pakāpes izmaiņām ar ierakstītajiem ģeoradara signāla atstarojumiem. Tomēr daudzos gadījumos nebija iespējams nošķirt sadalīšanās pakāpes izmaiņu ietekmi uz kūdras elektromagnētiskajām īpašībām no citu kūdras īpašību ietekmes, kas neļauj veikt viennozīmīgu situācijas analīzi. Tāpat grūti skaidrot gadījumus, kad tika identificētas līdzīga lieluma izmaiņas kūdras sadalīšanās pakāpē, taču ģeoradara signāla atstarojums no atbilstošā dziļuma netika saņemts. Sekojoši apšaubāms ir pieņēmums, ka izmaiņas tikai kūdras sadalīšanās pakāpē varētu izraisīt izteiktu ģeoradara signāla atstarojumu. Par to liecina arī atšķirības atstarojumu, kas tika sasaistīti ar vienāda lieluma kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām, amplitūdās (4. atstarojums Dzelves purvā un 2., 3. atstarojums Raganu purvā).

Nereti kā potenciāls iemesls identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem tiek minētas kūdras tipa izmaiņas (Kettridge et al., 2012; Slater, Reeve, 2002; Helleux, 1990). Atsevišķos pētījumos ir veikta iegūto rezultātu statistiska analīze (1.3. tabula), kuras rezultātā ir secināts, ka aptuveni pusē no gadījumiem ir izdevies sasaistīt kādu no reģistrētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem ar kūdras tipa izmaiņām. Savukārt Sasa (Sass et al., 2010) veiktie pētījumi norāda, ka kūdras botāniskā sastāva izmaiņu sasaiste ar identificētajiem atstarojumiem ir problemātiska.

Analizējot Cenas tīrelī iegūtos rezultātus, tika konstatēts, ka 4. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas atbilst dziļumam, kurā ieguļ aptuveni 20 cm biezs pārejas tipa kūdras slānis (4.6. un 4.7. attēls, 4.1.2. nodaļa). Līdzīgi Raganu purvā 2. atstarojums ir saņemts no dziļuma, kas atbilst dziļumam, kurā ieguļ pārejas tipa un zemā tipa kūdras slāņu robeža (4.5.2. nodaļa). Tomēr, ņemot vērā to, ka Cenas tīrelī 4. atstarojumam atbilstošajā dziļumā tika identificētas gan mitruma daudzuma, gan sadalīšanās pakāpes izmaiņas, viennozīmīgu kūdras tipa izmaiņu saistības ar 4. atstarojumu novērtējumu nav iespējams veikt. Līdzīgi Raganu purvā dziļumā, no kura tika saņemts 2. atstarojums, tika identificēta ne tikai robeža starp pārejas tipa kūdras un zemā tipa kūdras, bet arī sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.25. attēls). Savukārt Makinu purvā ierakstītajā radarogrammā netika identificēts atstarojums ne dziļumā, kas atbilst robežai starp augstā tipa kūdras un pārejās tipa kūdras, ne dziļumā, kas atbilst robežai starp pārejās tipa kūdras un zemā tipa kūdras (4.3.2. nodaļa). Atsevišķi izdalāms Laugas purvs, kurā ierakstītajā radarogrammā

identificētais 2. atstarojums ir ticis saņemts no dziļuma, kurā ir vērojama tikai robeža starp pārejas tipa un zemā tipa kūdras (4.4.2. nodaļa).

Šī pētījuma gaitā iegūtie rezultāti, līdzīgi kā to konstatējuši arī citi pētnieki, norāda uz to, ka iespējams kūdras tips ietekmē kūdras elektromagnētiskās īpašības pietiekoši būtiski, lai no robežas starp kūdras slāņiem, ko veido atšķirīga tipa kūdra, tiktu saņemts ģeoradara signāla atstarojums. Tomēr, ņemot vērā to, ka šī pētījuma gaitā apskatītajos purvos dziļumā, kurā tika konstatētas kūdras tipa izmaiņas, bija vērojamas arī citu kūdras īpašību izmaiņas, nebija iespējams izvērtēt atsevišķi kūdras tipa saistību ar identificētajiem atstarojumiem (Cenas tīrelī, Raganu purvā). Kā jau iepriekš minēts, atsevišķi izdalāms Laugas purvs, jo šajā gadījumā dziļumā, no kurā ierakstītajā radarogrammā saņemts identificētais 2. atstarojums, tika identificētas tikai kūdras tipa izmaiņas. Minētais uzskatāms par argumentu, kas apstiprina kūdras tipa izmaiņu ietekmi uz kūdras elektromagnētiskajām īpašībām. Savukārt, ja kūdras tips ietekmē kūdras elektromagnētiskās īpašības, ir grūti skaidrot Makinu purvā iegūtos rezultātus, kur netika identificēts atstarojums, kas būtu saistāms ar kūdras tipa izmaiņām.

Kopumā atzīmējams, ka kūdras botāniskā sastāva izmaiņas potenciāli varētu nozīmīgi ietekmēt kūdras elektromagnētiskās īpašības. Tā, piemēram, kūdras botāniskais sastāvs iespējams ietekmē to ūdens daudzumu kūdrā, kas atrodas saistītā stāvoklī. Tas savukārt ietekmētu kūdras kopējo  $\epsilon$  vērtību, jo saistītajam ūdenim tā būtiski atšķiras no brīvā ūdens  $\epsilon$  vērtības (Boyarskiy, Tikhonov, 2003). Taču, apskatot kūdras botānisko sastāvu kā faktoru, kas potenciāli ietekmē saistīto ūdeni, būtu nepieciešams izdalīt kūdras tipus, balstoties nevis uz kūdras veidošanās apstākļiem, bet gan balstoties uz to veidojošo augu struktūras spēju piesaistīt ūdens molekulas.

Šī pētījuma gaitā tika identificētas kūdras fizikālās īpašības, kas potenciāli varētu ietekmēt kūdras elektromagnētiskās īpašības, kā arī tika izstrādāta radiolokācijas pētījumu metodika, kuru izmantojot, turpmākos pētījumos būtu iespējams iegūt iespējami precīzus un kvalitatīvus radiolokācijas mērījumus purvos. Izstrādātās metodes un paņēmieni ir izmantojami, lai turpmākos pētījumos novērtētu purva kopējo uzbūvi kā arī kūdras slāņu elektromagnētisko īpašību mainību purva ģeoloģiskajā griezumā.

Tomēr līdz šim veikto pētījumu rezultāti, kā arī disertācijas izstrādes gaitā iegūtie rezultāti liecina par to, ka līdzšinēji izvēlēta pieeja, meklējot skaidrojumu no kūdras slāņa iekšienes saņemto ģeoradara signāla atstarojumiem, nav bijusi sekmīga. Vēl joprojām nav izstrādātas universāli pielietojami matemātiskie modeļi, ar kuru palīdzību būtu iespējams prognozēt ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma un signāla zudumu atkarību no kūdras fizikālajām īpašībām.

Tas skaidrojams ar to, ka līdzšinējos pētījumos vairumā gadījumu ir bijuši mēģinājumi nepastarpināti sasaistīt kūdras fizikālās īpašības ar identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem. Taču tādējādi tiek ignorēts fakts, ka elektromagnētisko viļņu atstarojums no divu slāņu robežas izveidojas gadījumā, ja šiem slāņiem ir atšķirīgs kompleksais gaismas laušanas koeficients (1.1.4. nodaļa). Proti atstarojumu neizraisa atšķirības starp slāņu botānisko sastāvu vai mitruma daudzumu vai kādu citu to fizikālo īpašību, bet gan atšķirības starp slāņu gaismas laušanas koeficienta reālajām vai imaginārajām daļām. Tās savukārt ir atkarīgas no slāņiem raksturīgajām kompleksajām dielektriskajām caurlaidībām un kompleksajām elektrovadītspējām (1.1.1. nodaļa).

Lai būtu iespējams nākotnē izstrādāt matemātiskus modeļus ar kuru palīdzību būtu iespējams prognozēt kāda kūdras slāņa kopējo gaismas laušanas koeficientu, ir nepieciešams noteikt katras kūdras fizikālās īpašības izmaiņu ietekmi uz to, saglabājot pārējās kūdras fizikālās īpašības konstantas. Tādēļ nākotnē nepieciešams laboratorijas apstākļos noteikt gan dielektriskās caurlaidības, gan elektrovadītspējas vērtības atkarībā no pieliktā elektriskā lauka frekvences kūdras paraugiem ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām.

Izmantojot šādu laboratorisku eksperimentu rezultātu statistisku analīzi, būtu iespējams novērtēt katras kūdras fizikālās īpašības ietekmi uz tās elektromagnētiskajām īpašībām un tādejādi prognozēt amplitūdas ģeoradara signāla atstarojumiem no tipiskām kūdras fizikālo īpašību robežām. Minētās zināšanas ievērojami palielinātu iegūto radiolokācijas mērījumu interpretatora iespējas sniegt informāciju par purva ģeoloģisko griezumumu, izmantojot tikai radiolokācijas datus.

Nav sagaidāms, ka šādas atkarības būs iespējams izstrādāt, izmantojot lauka apstākļos veiktus radiolokācijas mērījumus un to sasaisti ar pētījumu teritorijā ierīkotajos urbumos identificētajām kūdras fizikālo īpašību izmaiņām dažādos purvos, jo, apkopojot šī pētījuma gaitā iegūtos rezultātus, redzamas, ka daudzos gadījumos dziļumā no kura saņemts kāds atstarojums ir vērojamas vairāku kūdras fizikālo īpašību izmaiņas (5.1. tabula). Tādējādi nav iespējams viennozīmīgi novērtēt to, kura no apskatītajām īpašībām ir ietekmējusi konkrētā atstarojuma izveidošanos. Tā, piemēram, analizējot Cenas tīrelī identificēto 4. atstarojumu nebija iespējams izšķirt mitruma daudzuma, sadalīšanās pakāpes un botāniskā sastāva ietekmi uz konkrētā atstarojuma izveidošanos (4.1.2. nodaļa). Līdzīgi Makinu purvā 5. atstarojums tika saņemts no dziļuma kurā tika konstatētas gan mitruma daudzuma gan sadalīšanās pakāpes izmaiņas (4.16. attēls).

5.1. tabula. Kūdras īpašību izmaiņas, kas iespējams izraisījušas ģeoradara signāla atstarojumu

Apzīmējumi: W – mitruma daudzums, SP –sadalīšanās pakāpe, B<sub>(a-p)</sub> – robeža starp augstā un pārejas tipa kūdru, B<sub>(z-p)</sub> – robeža starp pārejas un zemā tipa kūdru, A – pelnainība.

Table 5.1. Changes of peat properties that possibly are related to identified reflections

Legend: W – moisture content, SP – degree of decomposition, B<sub>(a-p)</sub> – boundary between raised bog peat and transitional peat, B<sub>(z-p)</sub> – boundary between transitional peat and fen peat, A – ash content.

Īpašība, kuras izmaiņas tika identificēta ģeoloģiskajā griezumā	Gadījumu skaits, kuros ir identificēts ar izmaiņām saistīts atstarojums	Gadījumu skaits, kuros nav identificēts ar izmaiņām saistīts atstarojums
W	5	2
SP	4	3
B <sub>(a-p)</sub>	-	3
B <sub>(z-p)</sub>	1	1
W; SP	2	-
B <sub>(z-p)</sub> ; SP	1	-
W; SP; B	1	-
W; SP; A	1	-

Radiolokācijas kā arī citu netiešo ģeofizikālo pētījumu metožu lietderību nosaka iespējas ar konkrētās metodes palīdzību iegūt zināšanas par pētījumu teritorijas ģeoloģisko uzbūvi. Taču apskatot un analizējot ar katru metodi iegūtos mērījumus, jāņem vērā, ka, tās izmantojot, tiek noteiktas tās nogulumu slāņu īpašības, kas var tikt nomērītas ar konkrēto mērījumu iekārtu (magnētisms, elastība, cietība, gaismas laušanas koeficients, elektrovadītspēja, radioaktīvo elementu daudzums utt.). Sekojoši, izmantojot kādu konkrētu ģeofizikālo pētījumu metodi, var tikt noteiktas nogulumu slāņu robežas, kas bieži vien nesakrīt ar nogulumu slāņu robežām, kas tiek noteiktas, izmantojot tradicionālās ģeoloģisko pētījumu metodes. Nākotnē uzmanība būtu jāpievērš tam kādu nogulumu īpašību sadalījumu ir iespējams noteikt, piemēram ar ģeoradara palīdzību, nevis tam, vai ar

konkrēto iekārtu ir iespējams noteikt robežas, kas tiek izdalītas pielietojot klasiskās ģeoloģisko pētījumu metodes.

### 5.3. Radiolokācijas metodi aprakstošie termini

Latvijā līdz šim radiolokācijas pētījumus ir veikuši salīdzinoši neliels skaits pētnieku. Tomēr pētniecības metode tiek aizvien plašāk pielietota gan zinātniskos, gan lietišķos pētījumos. Arī pētniecības objektu daudzveidība ar katru gadu palielinās, dažādojas izmantotās tehnoloģiskās iekārtas un tām atbilstošās norādes, un lietotāju rokasgrāmatas. Tā šobrīd Latvijā dažādas institūcijas savos pētījumos izmanto Latvijā, Krievijā, Zviedrijā un Itālijā ražotas iekārtas, bet periodiski, īslaicīgu pētījumu veikšanai, tiek ievestas līdzīgas ASV un Kanādā ražotas iekārtas. Tādēļ nav pārsteidzoši, ka vairumā gadījumu lietotā terminoloģija, atsevišķu darbību un procedūru nosaukumi un to apzīmējumi visai būtiski atšķiras. Kā rezultātā, nezinot katra šādā pētījuma iekārtu specifiku, ne vienmēr ir iespējams atpazīt veiktās procedūras saturu un nozīmi. Jo īpaši sarežģīti ir pārliecināties par šādu pētījumu kvalitāti, ja atbilstošais skaidrojošais teksts ir tulkots no oriģinālvalodas, vai aprakstu veidošanā angļu valoda ir izmantota par starpniekvalodu.

Minētais norāda uz nepieciešamību izstrādāt vienotu terminoloģiju, kas būtu izmantojama, aprakstot radiolokācijas pētījumus latviešu valodā.

Tā, piemēram, līdz šim nav viennozīmīgi noteikts kā būtu jāsauc iekārtu, ar kuru tiek veikti radiolokācijas pētījumi. Zinātniskajās publikācijās, kurās tiek apskatīta ar radiolokācijas metodiku saistītā problemātika, iekārta, ar kuru tiek veikti radiolokācijas mērījumi, vairumā gadījumu angļiski tiek saukta par „Ground penetrating radar” (piemēram, Jol, 2009; Daniels, 2004). Izvēlētajam nosaukumam ir salīdzinoši veiksmīga abreviatūra – „GPR”, kas līdzīgi kā gadījumā ar globālās pozicionēšanas sistēmas abreviatūru „GPS”, ir plaši izplatīta un sadzīviski tiek uzskatīta kā vispār pieņemta un tiek plaši lietota. Daudz retāk šādu iekārtu nosaukums tiek tieši saistīts ar pētāmo materiālu (vidi) izceļot, piemēram, ledāju pētījumus (Ice penetrating radar; MacGregor et al., 2009), betonu (Concrete Penetration Radar), nogulumu slāni zem augsnes (Subsurface Penetration Radar). Vēl plašāks radiolokācijas iekārtu apzīmējums ir gadījumos, kad šādu iekārtu apkalpošana ir paredzēta vienkāršoti un tad nosaukums tie pārveidots par „meklēšanas ierīci” utml., kas ir visai izplatīta prakse ASV, retāk Vācijā.

Tieši tulkojot izmantoto terminu tiek iegūts salīdzinoši neveiksmīgs salikums – „Zemi penetrējošais radars”. Tāpat par neveiksmīgiem terminiem būtu uzskatāmi arī tādi salikumi kā – „Zemes caurskates radars”, „Grunts penetrācijas radars” un citi līdzīgi veidoti termini. Jo, piemēram, neskatoties uz to, ka terminam „Grunts penetrācijas radars” būtu identiska abreviatūra („GPR”) kā angļiski lietotajam terminam, kas atvieglotu komunikāciju starptautiskos pētījumos, šāds termins tikai daļēji atspoguļo metodes pielietošanas iespējas. Tas ir, termins „grunts” latviski tiek lietots ļoti specifiskos gadījumos apskatot jautājumus, kas saistīti ar inženierģeoloģiskiem un ģeotehniskiem, retāk augsnes pētījumiem. Rezultātā var veidoties maldīgs priekšstats, ka ar radiolokācijas metodi var tikt veikti tikai inženierģeoloģiski pētījumi. Līdzīgi maldinošs būtu termins „Zemes caurskates radars”, jo ar radiolokācijas metodi ir iespējams veikt arī ūdenstilpju un ledāju pētījumus. Tāpat nebūtu vēlama vairāku terminu vienlaicīga lietošana, runājot par atšķirīgiem pētījumu priekšmetiem vai vidēm.

Tā, piemēram, runājot par ledāju pētījumiem, nebūtu pareizi izmantoto iekārtu apzīmēt ar terminu „Ledus caurskates radars” savukārt par nogulumiežu pētījumiem –



„Zemes caurskates radars”. Minētais tikai sarežģītu pētījuma apraksta izklāstu, kā arī potenciāli var radīt pārpratumus jo īpaši nespeciālistu vidū.

Par veiksmīgu terminu būtu uzskatāms termins „Ģeoradars”, jo tas ir salīdzinoši visaptverošs, kā arī labskanīgs un vienkāršs. Tādējādi turpmākos pētījumos, lai latviski identificētu iekārtu, ar kuru tiek veikti radiolokācijas pētījumi, būtu ieteicams lietot terminu „Ģeoradars”. Atzīmējams, ka minētais termins jau ir salīdzinoši bieži lietots zinātniskajā literatūrā (Karušs, Segliņš, 2014; Vībāns, Karušs, 2013), kas atvieglotu tieši šāda termina ieviešanu.

Līdzīgi turpmāk veiktā radiolokācijas profila ieraksts būtu saucams par radarogrammu, savukārt ierakstītajās radarogrammās identificētie ģeoradara signāli, kas ir tikuši saistīti ar nogulumu slāņu robežām, būtu saucami par ģeoradara signāla atstarojumiem. Kopumā, lai izvairītos no pārpratumiem un nekorektas dažādu brīvi izvēlētu terminu lietošanas, nākotnē latviskas terminoloģijas attīstībai šajā jomā būtu vērtāms atsevišķs pētījums.

## Secinājumi

Promocijas darba pētījuma izstrādes gaitā tika iegūts un izvērtēts autora iegūtais oriģinālais faktiskais materiāls. Nozīmīgākā tā daļa ir publicēta zinātniskos rakstos un aprobēta zinātniskās konferencēs, kas ļauj autoram izdarīt pietiekoši pamatotus svarīgākos secinājumus, kas apliecina pētījumam izvirzītā mērķa un uzdevumu izpildi. Starp tiem būtiskākie attiecināmi uz kūdras pētījumos izmantoto radiolokācijas pētījumu metodiku un pētījuma laikā noteikto kūdras fizikālo īpašību ietekmi uz kūdras elektromagnētiskajām īpašībām.

Izmantojot ģeoradaru purvu nogulumu pētījumos, ir iespējams iegūt radarogrammas, kas satur daudz lokālu salīdzinoši vāju ģeoradara signāla atstarojumu. Šie atstarojumi ir saistāmi ar lokālām kūdras elektromagnētisko īpašību izmaiņām. Tomēr pētījuma gaitā tika apsekots 21 purvs, no kuriem tikai piecos tika konstatēti izteikti ģeoradara signāla atstarojumi. Pie tam ģeoradara signāla atstarojumi tika identificēti tikai atsevišķās purvu daļās. Tādējādi jāsecina, ka kūdrai kopumā ir raksturīga maza to elektromagnētisko īpašību mainība atkarībā no tās fizikālajām īpašībām, un tikai retos gadījumos robežas starp kūdras slāņiem ar atšķirīgām elektromagnētiskajām īpašībām ir izteiktas un laterālā virzienā izturētas.

Līdzšinēji veikto radiolokācijas pētījumu rezultātu interpretācijās un skaidrojumos dominē viedoklis, ka kūdras elektromagnētiskās īpašības nosaka tikai tās mitruma daudzums. Autora iegūtie Makinu purva, Laugas purva un Raganu purva pētījumu rezultāti liecina par to, ka visus ģeoradara signāla atstarojumus, kas saistāmi ar robežām starp atšķirīgiem kūdras slāņiem, nevar skaidrot tikai ar mitruma atšķirībām starp tiem.

Makinu un Laugas purvos autora veikto pētījuma rezultāti liecina par to, ka iegūtos atstarojumus nevar skaidrot, apskatot kūdras vielas fizikālās īpašības atsevišķi vienu no otras. Kūdras elektromagnētiskās īpašības ietekmē ne tikai katras konkrētās kūdras vielas fizikālās īpašības izmaiņas, bet arī kūdras fizikālo īpašību kopuma izmaiņas.

Pētījumi Latvijas augstā tipa purvos norāda, ka ģeoradara signāla atstarojumu var izraisīt kūdras botāniskā sastāva izmaiņas. Tādējādi radiolokācijas mērījumi var tikt izmantoti, lai izsekotu robežas starp kūdras slāņiem ar atšķirīgu botānisko sastāvu. Tomēr, salīdzinot Cenas tīrelī, kā arī Makinu un Laugas purvā iegūtos rezultātus, jāsecina, ka kūdras veidošanās apstākļi nav noteicošais faktors, kas ietekmē tās elektromagnētiskās īpašības. Autora veiktie pētījumi Latvijas purvos norāda, ka, analizējot radiolokācijas mērījumus, nav pamata vienkāršot pētītās kūdras īpašību mainību un prognozēt, ka ģeoradara signāla atstarojumus visos gadījumos izraisīs tieši robeža starp augstā tipa kūdras un pārejas tipa kūdras vai pārejas tipa kūdras un zemā tipa kūdras. Tādējādi šāds nosacīts dalījums starp dažāda tipa kūdras iegulas vertikālā griezumā un laterālā virzienā ir uzskatāms par aptuvenu jeb indikatīvu, orientējošu, kas nav pietiekošs, lai veiktu iegūto ģeoloģisko pētījumu rezultātu sasaisti ar identificētajiem ģeoradara signāla atstarojumiem.

Makinu purvā veikto pētījumu rezultāti norāda uz to, ka ģeoradara signāla atstarojumu var izraisīt kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņas. Noskaidrots, ka kūdras elektromagnētiskās īpašības nemainās nozīmīgi un lēcienveidīgi pie kāda konkrēta sadalīšanās pakāpes lieluma, bet šīs izmaiņas ir pakāpeniskas, līdz ar kūdras sadalīšanās pakāpes izmaiņām. Minētais norāda, ka, izmantojot ģeoradaru, ir iespējams izsekot kūdras slāņus ar atšķirīgu sadalīšanās pakāpi laterālā virzienā.

Veiktais pētījums nepārprotami norāda uz visai atšķirīgiem ģeoradara signāla izplatīšanās ātrumiem dažādos pēc to fizikālajām īpašībām kūdras slāņos. Tādēļ zinātniskos purvu pētījumos nav pamatota vidējā ģeoradara signāla izplatīšanās ātruma purva griezumā izmantošana. Turpmākos līdzīga rakstura pētījumos ģeoradara signāla

izplatīšanās ātrums ir jānosaka līdz katrai atstarotājpvirsmi, kas saistāma ar ierakstītajās radarogrammās identificētajiem atstarojumiem.

Līdzšinējie autora veiktie pētījumi norāda, ka ar radiolokācijas metodi ir iespējams veikt kūdras slāņa biezuma mērījumus ar precizitāti, kas ir salīdzināma ar urbšanas dziļuma precizitāti vismaz līdz 5,5 m dziļumam.

Autora veiktais pētījums ļauj ieskicēt turpmākos pētniecības virzienus. Tā, piemēram, lai izstrādātu matemātiskus modeļus, kas ļautu kvantitatīvi prognozēt, vai no kādas kūdras slāņu robežas izveidosies ģeoradara signāla atstarojums, nākotnē nepieciešams kūdras paraugiem ar atšķirīgām fizikālajām īpašībām laboratorijas apstākļos noteikt gan dielektriskās caurlaidības, gan elektrovadītspējas vērtības atkarībā no pieliktā elektriskā lauka frekvences.

Tāpat nākotnē nepieciešams izstrādāt purvu nogulumu klasifikāciju, ar kuru būtu iespējams izdalīt purvu nogulumu slāņus, balstoties tieši uz to elektromagnētiskajām īpašībām.

## Literatūras saraksts

- Bērziņš, D., Karušs, J., 2014b. Mapping shallow groundwater surface in terrigenous sediments using ground penetrating radar. In: Zelčs, V., Nartišs, M. (eds.), *Excursion guide and abstracts of the INQUA Peribaltic Working Group Meeting and field excursion in Eastern and Central Latvia, August 17-22, 2014*, Eastern and central Latvia. University of Latvia, Riga, pp. 97-98.
- Bērziņš, D., Karušs, J., 2014a. Mapping shallow groundwater surface in terrigenous sediments using ground penetrating radar. In: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 293-294.
- Bērziņš, D., Karušs, J., Guščika, E., 2015. Radiolokācijas izpētes rezultāti Īles meža senkapos. In: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 73. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 261-263.
- Boelter, D. H., 1968. Important physical properties of peat materials. In *Proceedings of the 3rd International Peat Congress*. Quebec, Canada, pp. 150-154.
- Bogorobskiy, V. V., Trepov, G. V., 1979. Radiolokatsionnye izmereniya tolshchiny zalezhey torfa i sapropelya. *Zhurnal mekhanicheskoy fiziki* 49(3), 670-673.
- Bogorodsky, V. C., Gudmandsen, B., Gudmandsen, P., 1985. *Radioglaciology*. D. Reidel publishing, Dordrecht, 254 pp.
- Boyarskiy, D. A., Tikhonov, V. V., 2003. *Vliyaniye svyazannoy vody na dielektricheskuyu pronitsayemost' vlazhnykh i merzlykh pochv*. Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, Moskva, 47 s.
- Botero, W. G., de Oliveira, L. C., Rocha, J. C., Rosa, A. H., dos Santos, A., 2010. Peat humic substances enriched with nutrients for agricultural applications: Competition between nutrients and non-essential metals present in tropical soils. *Journal of Hazardous Materials* 177, 307-311. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.12.033.
- Burger, H. R., Sheehan, A. F., Jones, C. H., 2006. *Introduction to Applied Geophysics*. Norton & Company Inc., New York, 554 pp.
- Burlakovs, J., Āriņa, D., Karušs, J., Vlads, A. 2014. Tehnogēnie nogulumi kā potenciālie derīgie izrakteņi. In: *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 297-299.
- Carr, J. J., 2001. *Practical antenna handbook fourth edition*. McGraw-Hill, United States of America, 609 pp.
- Castro, D., Souto, M., Garcia-Rodeja, E., Pontevedra-Pombal, X., Fraga, M. I., 2015. Climate change records between the mid - and late Holocene in a peat bog from Serra do Xistral (SW Europe) using plant macrofossils and peat humification analyses. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 420, 82-95.
- Chernetsov, E. A., Beletsky, N.A., Baev, Yu, M., 1987. Radar profiling of peat and gyttja deposits. In Rubec, C. D., Overend, R. P. (eds.), *Wetlands/Peatlands. Proceedings of Symposium 87*. Edmonton, Canada, pp. 15-21.
- Cojocar, C., Macoveanu, M., Cretescu, I., 2011. Peat-based sorbents for the removal of oil spills from water surface: Application of artificial neural network modeling. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 384, 675-684. doi:10.1016/j.colsurfa.2011.05.036.
- Comas, X., Slater, L., 2007. Evolution of biogenic gases in peat blocks inferred from noninvasive dielectric permittivity measurements. *Water Resource Research* 43, W05424, doi:10.1029/2006WR005562.

- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2004. Geophysical evidence for peat basin morphology and stratigraphic controls on vegetation observed in a Northern Peatland. *Journal of Hydrology* 295, 173-184.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2005a. Stratigraphic controls on pool formation in a domed bog inferred from ground penetrating radar (GPR). *Journal of Hydrology* 315, 40-51.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2005b. Spatial variability in biogenic gas accumulations in peat soils is revealed by ground penetrating radar (GPR). *Geophysical Research Letters* 32, L08401, doi:10.1029/2004GL022297.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2005c. Geophysical and hydrological evaluation of two bog complexes in a northern peatland: Implications for the distribution of biogenic gases at the basin scale. *Global Biogeochemical Cycles* 19, GB4023, doi:10.1029/2005GB002582.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2007. In situ monitoring of free-phase gas accumulation and release in peatlands using ground penetrating radar (GPR). *Geophysical Research Letters* 34, L06402, doi:10.1029/2006GL029014.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2008. Seasonal geophysical monitoring of biogenic gases in a northern peatland: implications for temporal and spatial variability in free phase gas production rates. *Journal of Geophysical Research - Biogeosciences* 113, G01012, doi:10.1029/2007JG000575.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2011a. Atmospheric pressure drives changes in the vertical distribution of biogenic free-phase gas in a northern peatland. *Journal of Geophysical Research* 116, G04014, doi:10.1029/2011JG001701.
- Comas, X., Slater, L., Reeve, A., 2011b. Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms. *Journal of Hydrology* 399, 173-184.
- Conyers, L. B., 2004. *Ground-Penetrating Radar for Archeology*. A division of Rowman & Littlefield Publishers, Walnut Creek, California, 224 pp.
- Cook, J. C., 1960. Proposed monocycle – pulse VHF radar for airborne ice and snow measurements. *Trans. Amer. IEE, pt.1 Communication and Electronics* 79, 588-594.
- Damiata, B. N., Steinberg, J. M., Bolender, D. J., Zoëga G., 2013. Imaging skeletal remains with ground-penetrating radar: comparative results over two graves from Viking Age and Medieval churchyards on the Stóra-Seyla farm, northern Iceland. *Journal of Archaeological Science* 40, 268-278, doi: 10.1016/j.jas.2012.06.031.
- Daniels, D. J., 2004. *Ground Penetrating Radar, 2nd edition*. The Institute of Engineering and Technology, UK, 752 p.
- de Castro, D. L., Branco, R. M. G. C., 2003. 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics* 54, 127-144, doi:10.1016/j.jappgeo.2003.08.021.
- Dorn, C., Linde, N., Doetsch, J., Borgne, T., Bour, O., 2012. Fracture imaging a granitic rock aquifer using multiple – offset single hole and cross – hole GPR reflection data. *Journal of Applied Geophysics* 78, 123-132.
- Eckstein, J., Leuschner, H. H., Bauerochse, A., Sass-Klaassen, U., 2009. Subfossil bog-pine horizons document climate and ecosystem changes during the Mid-Holocene. *Dendrochronologia* 27, 129-146. doi:10.1016/j.dendro.2009.06.007.
- Finkel'shteyn, M. I., 1974. Nekotorye voprosy radiolokatsionnogo zondirovaniya tonkikh sloistykh sred. *Radiotekhnika i elektronika* 19(3), 528-536.
- Finkel'shteyn, M. I., Karpukhin, V. I., Kutev, V. A., Metelkin, V. N., 1994. *Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya*. Radio i svyaz', Moskva, 216 s.

- Finkel'shteyn, M. I., Kutev, V. A., Zolotarev, V. P., 1986. *Primenenie radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii*. Nedra, Moskva, 129 s.
- Finkel'shteyn, M. I., Mendel'son, V. L., Kutev, V. A., 1977. *Radiolokatsiya sloistykh zemnykh pokrovov*. Sovetskoe Radio, Moskva, 178 s.
- Fröhlich, H., 1949. *Theory of dielectrics: dielectric constant and dielectric loss*. Clarendon Press, Oxford, 180 pp.
- Ghasemi, F. Sh. A., Abrishamian, M. S., 2007. A novel method for FDTD numerical GPR imaging of arbitrary shapes based on Fourier transform. *NDT & E International* 40(2), 140-146.
- Girardi, J. D., Davis, D. M., 2010. Parabolic dune reactivation and migration at Napeague, NY, USA: Insights from aerial and GPR imagery. *Geomorphology* 114, 530–541. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.08.011.
- Halleux, L., 1990. Ground penetrating radar applied to the study of peat bogs and moors. *Annales Societe Geologie Belgique* 113, 115-123.
- Hanninen, P., 1992. Application of ground penetrating radar techniques to peatland investigations. In: Hanninen, P., Autio, S. (eds.), Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar June 8-13, 1992. Geological Survey of Finland, Rovaniemi, Finland, pp. 217-221.
- Holden, J., 2006. Sediment and particulate carbon removal by pipe erosion increase over time in blanket peatlands as a consequence of land drainage. *Journal of Geophysical Research* 111, doi:10.1029/2005 JF000386.
- Holden, J., Burt, T. P., Vilas, M., 2002. Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 235-249.
- Hurdeman, A. A., 2003. *The worldwide history of telecommunications*. Wiley-IEEE Press, New Jersey, United States of America, 660 pp.
- Izyumov, C. V., Druchinin, S. V., Voznesenskiy, A. S., 2008. *Teoriya i metody georadiolokatsii*. Izdatel'stvo Gornaya kniga, Moskva, 197 s.
- Jol, H. M., 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Oxford, 524 pp.
- Kalniņa, L., 2008. Cenas tīreļa veidošanās un attīstība. *Grām. Pakalne, M. (red.), Purvu aizsardzība un apsaimniekošana īpaši aizsargājamās dabas teritorijās Latvijā*. Jelgavas tipogrāfija, Rīga, lpp. 28-33.
- Kalniņa, L., Lācis, A., Sičovs, G., Diņķīte, A., Bērtulsone, L., Aļukēviča, S., 2005. Cenas tīreļa attīstības dinamika un to ietekmējošie faktori. *Latvijas Universitātes 63. zinātniskā konference. Ģeogrāfija, Ģeoloģija, Vides zinātne. Referātu tēzes*. Rīga, LU Akadēmiskais apgāds, lpp. 123-126.
- Karušs, J., 2010a. Ģeoradara pētījumi Taurenas pagasta apkārtnes smilšu iegulās. In. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 68. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 308-310.
- Karušs, J., 2010b. Granīta pamatklintāja pētījumi ar radiolokācijas metodi Perna pilsētas apkārtnē Somijā. In. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 68. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 307-308.
- Karušs, J., 2013. High precision calculation of move out correction in GPR measurements. In. *Proceedings of International scientific forum, ISF 2013, volume 3, December 12 - 14, 2013*. European Scientific Institute publishing, Tirana Albania, pp. 205-209.
- Karušs, J., 2014a. Kopējā viduspukta metodes izmantošana purvu nogulumu pētījumos. In. *Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 312-314.

- Karušs, J., 2014b. High precision calculation of move out correction in GPR measurements. *European Scientific Journal. February 2014 Special edition (3)*, 206-210.
- Karušs, J., Bērziņš, D., In press. Ground-penetrating radar study of the Cenozoic bog, Latvia: Linkage of reflections with peat moisture content. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 14 p.
- Karušs, J., In press a. Kopējā viduspunkta metodes izmantošana kūdras nogulumu pētījumos. *LU rakstu Zemes un Vides zinātņu sērija*. 13 lpp.
- Karušs, J., In press b. New approach of depth from which GPR signals are received determination. *Geological Quarterly*. 10 p.
- Karušs, J., Segliņš, V., 2012. Pētījumi ar ģeoradaru taurenes apkārtnes smilšu iegulās. *LU rakstu Zemes un Vides zinātņu sērija* 789, 19-29.
- Karušs, J., Segliņš, V., 2013a. Cenozoic bog radiolocation signal analysis. *RTU zinātnisko rakstu sērija Materiālzinātne un lietišķā ķīmija* 29, 21-28.
- Karušs, J., Segliņš, V., 2013b. Seda peat bog deposit research with radiolocation method. *In. 17<sup>th</sup> International conference "EcoBalt 2012". Book of Abstracts*. University of Latvia press, Riga. pp. 38.
- Karušs, J., Segliņš, V., 2014. Methodical approach of peat bog radiolocation. *Grām. Segliņš, V. (red.), Latvijas derīgie izrakteņi, jaunas tehnoloģijas, materiāli un produkti*. RTU izdevniecība, Rīga, lpp. 127-137.
- Karušs, J., Segliņš, V., Pipira, D., 2012. Mālainās gruntīs iegūto radiolokācijas signālu analīze. *RTU zinātnisko rakstu sērija Materiālzinātne un lietišķā ķīmija* 26, 21-27.
- Karušs, J., Vībāns, J., 2013. Radiolokācijas metodes izmantošana kūdras krājumu aprēķinos. *Grām. Andersons, B., Segliņš, V., Dubrovskis, D., Galoburda, R., Paeglītis, A. (red.), Valsts pētījumu programmas rakstu krājums: Vietējo resursu ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)*. Latvijas valsts koksnes ķīmijas institūts, Rīga, lpp. 56-60.
- Kearey, F., Brooks, M., Hill, I., 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration 2nd ed.* Blackwell Science, Oxford, 272 pp.
- Kettridge, N., Binley, A., Comas, X., Cassidy, N. J., Baird, A. J., Harris, A., van der Kruk, J., Strack, M., Milner, A. M., Waddington, J. M., 2012. Do peatland microforms move through time? Examining the developmental history of a patterned peatland using ground-penetrating radar. *Journal of Geophysical Research* 117, G03030, doi:10.1029/2011JG001876.
- Kettridge, N., Comas, X., Baird, A., Slater, L., Strack, M., Thompson, D., Jol, H., Binley, A., 2008. Ecohydrologically important subsurface structures in peatlands revealed by ground-penetrating radar and complex conductivity surveys. *Journal of Geophysical Research* 113, G04030, doi:10.1029/2008JG000787.
- Krauklis, I., 1997. Raganu purvs. *Grām. Kavacs, G. (red.), Latvijas daba, enciklopēdija. 4. sēj.*, Preses nams, Rīga, lpp. 211.
- Krūmiņš, J., Silamiķele, I., Purmalis, O., Stankeviča, K., Kuške, E., Pujāte, A., Ozola, I., Ceriņa, A., Rūtiņa, L., Stivriņš, N., 2012. *Kūdras un sapropeļa pētījumu metodes*. Latgales druka, Rīga, 80 lpp.
- Kušķe, E., Silamiķele, I., Kalniņa, L., Kļaviņš, M., 2010. Peat Formation Conditions and Peat Properties: a Study of Two Ombrotrophic Bogs in Latvia. *In. Kļaviņš, M. (eds.), Mires and Peat*. University of Latvia Press, Riga, pp. 56-70.
- Lamsters, K., Karušs, J., 2014. Glacial landforms in the forefield of Múlajökull surge-type glacier, Central Iceland. *In. Zelčs, V., Nartišs, M. (eds.), Excursion guide and abstracts of the INQUA Peribaltic Working Group Meeting and field excursion in Eastern and*

- Central Latvia, August 17-22, 2014, Eastern and central Latvia. University of Latvia, Riga, pp.120-121.
- Leopold, M., Volkel, J., 2003. GPR images of periglacial slope deposits beneath peat bogs in the Central European Highlands, Germany. In Bristow, C. S., Jol, H. M. (eds.), *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society Special Publication 211, London, pp. 181-189.
- Lorenzo, H., Rial, F. I., Pereira, M., Solla, M., 2011. A full non-metallic trailer for GPR road surveys. *Journal of Applied Geophysics* 75, 490-497, doi:10.1016/j.jappgeo.2011.07.021.
- Lowe, D J., 1985. Application of impulse radar to continuous profiling of tephra - bearing lake sediments and peats : an initial evaluation. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 28, 667-674.
- Lowry, C., Fratta, D., Anderson, M., 2009. Ground penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland. *Journal of Hydrology* 373, 68-79.
- MacGregor, J. A., Matsuoka, K., Studinger, M., 2009. Radar detection of accreted ice over Lake Vostok, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters* 282, 222-233.
- Marple, L., 1981. A new autoregressive spectrum analysis algorithm. *IEEE Trans.* 28(4), 441-454.
- Milsom, J., 2003. *Field Geophysics 3rd ed.*. John Wiley & Sons, West Sussex, 304 pp.
- Musgrave, H., Binley, A., 2011. Revealing the temporal dynamics of subsurface temperature in a wetland using time-lapse geophysics. *Journal of Hydrology* 396, 258-266.
- Neal, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66, 261-330.
- Negri, S., Leucci, G., Mazzone, F., 2008. High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archeological items in a geologically complex subsurface. *Journal of Applied Geophysics* 65(3/4), 111-120.
- Nomals, P., 1943. *Zemes bagātību pētīšanas institūta raksti 4. Vidzemes un Latgales purvu apskats*. Zemes bagātību pētīšanas institūts, Rīga, lpp. 78-79.
- Oliveira, M., Porsani, J., Lima, G., Jeske-Pieruschka, V., Behling, H., 2012. Upper Pleistocene and Holocene peatland evolution in Southern Brazilian highlands as depicted by radar stratigraphy, sedimentology and palynology. *Quaternary Research* 77, 397-407.
- Orlando, L., Slob, E., 2009. Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building. *Journal of Applied Geophysics* 67, 327-334.
- Ozola, I., 2013. *Holocēna organogēnie nogulumi un to uzkrāšanās apstākļu izmaiņas purvos Ziemeļvidzemē*. Latvijas Universitāte, Rīga, 101 lpp.
- Parsekian, A. D., Comas, X., Slater, L., Glaser, P. H., 2011. Geophysical evidence for the lateral distribution of free phase gas at the peat basin scale in a large northern peatland. *Journal of Geophysical Research* 116, G03008, doi:10.1029/2010JG001543.
- Parsekian, A. D., Slater, L., Gimenez, D., 2012. Application of ground-penetrating radar to measure near-saturation soil water content in peat soils. *Water Resour. Res.* 48, W02533, doi:10.1029/2011WR011303.
- Parsekian, A., Slater, L., Comas, X., Glaser, P., 2010. Variations in freephase gases in peat landforms determined by ground-penetrating radar. *Journal of Geophysical Research* 115, G02002, doi:10.1029/2009JG001086.
- Peatros, J., Ware, M., 2013. *Physics of light and optics*. Brigham Young University, Utha, 344 pp.
- Plado, J., Sibul, I., Mustasaar, M., Jõelett, A., 2011. Ground-penetrating radar study of the Rahivere peat bog, eastern Estonia. *Estonian journal of earth sciences* 60, 31-42.



- Platacis, J., 1974. *Elektrība*. Zvaigzne, Rīga, 503 lpp.
- Porsani, J. L., Jangelme, G. M., Kipnis, R., 2010. GPR survey at Lapa do Santo archaeological site, Lagoa Santa karstic region, Minas Gerais state, Brazil. *Journal of Archaeological Science* 37, 1141-1148.
- Pratte, S., Mucci, A., Garneau, M., 2013. Historical records of atmospheric metal deposition along the St. Lawrence Valley (eastern Canada) based on peat bog cores. *Atmospheric Environment* 79, 831-840.
- Prinzio, M. D., Bittelli, M., Castellarin, A., Pisa, P. P., 2010. Application of GPR to the monitoring of river embankments. *Journal of Applied Geophysics* 71(2/3), 53-61.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Juan, A. P., Soriano, M. A., Casas-Sainz, A. M., 2009. Characterization of karst hazards from the perspective of the doline triangle using GPR — Examples from Central Ebro Basin (Spain). *Engineering Geology* 108, 225-236.
- Raymond, C. W., 2009. *Radar Origins Worldwide*. Trafford Publishing, Victoria, BC, Canada, 420 pp.
- Reynolds, J., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley, New York, 806 pp.
- Rieksts, I., 1994a. Cenas tīrelis. *Grām. Kavacs, G. (red.), Latvijas daba, enciklopēdija. 1. sēj.*, Preses nams, Rīga, lpp. 184.
- Rieksts, I., 1994b. Daibes purvs. *Grām. Kavacs, G. (red.), Latvijas daba, enciklopēdija. 1. sēj.*, Preses nams, Rīga, lpp. 208.
- Rieksts, I., 1995. Dzelves-Kroņa purvs. *Grām. Kavacs, G. (red.), Latvijas daba, enciklopēdija. 2. sēj.*, Preses nams, Rīga, lpp. 27.
- Sass, O., Friedmann, A., Haselwanter, G., Wetzel, K. F., 2010. Investigating thickness and internal structure of alpine mires using conventional and geophysical techniques. *Catena* 80, 195-203.
- Sharma, V. P., 1997. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University press. Cambridge, United Kingdom, 500. pp.
- Sheng, Y. L., Smith, C., MacDonald, G. M., Kremenetski, K. V., Frey, K. E., Velichko, A. A., Lee, M., Beilman, D. W., Dubinin, P., 2004. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool. *Global Biogeochem. Cycles* 18, GB3004, doi:10.1029/2003GB002190.
- Skolnik, M. 2008. *Radar Handbook, Third edition*. McGraw-Hill Professional, United States of America, 1328 pp.
- Slater, L. D., Reeve, A., 2002. Case history: investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics* 67, 365-378.
- Słowik, M., 2011. Changes of river bed pattern and traces of anthropogenic intervention: The example of using GPR method (the Obra river, western Poland). *Applied Geography* 31(2), 784-799.
- Strack, M., Mierau, T., 2010. Evaluating spatial variability of free-phase gas in peat using ground-penetrating radar and direct measurement. *Journal of Geophysical Research* 115, G02010, doi:10.1029/2009JG001045.
- Students, O., 1971. *Optika*. Zvaigzne, Rīga, 417 lpp.
- Šķiņķis, P., 1998. Ropažu līdzenums. *Grām. Kavacs, G. (red.), Latvijas daba, enciklopēdija. 5. sēj.*, Preses nams, Rīga, lpp. 12-13.
- Šnore, A., 2004. *Kūdra Latvijā*. Latvijas kūdras ražošanas asociācija, Rīga, 62 lpp.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990. *Applied Geophysics, second edition*. Cambridge University Press, United States of America, 792 pp.
- Thide, B., 2011. *Electromagnetic Field Theory*. Dover publications, United States of America, 240 pp.

- Tolonen, K., Rummukainen, A., Toikka, M., Martilla, I., 1984. Comparison between conventional peat geological and improved electronic methods in examining economically important peatland properties. *In. Proceedings of the 7th International Peat Congress, Volume 2, June 18-23, 1984*, Dublin, Ireland pp. 1-10.
- Van Bellen, S., Dallaire, P. L., Garneau, M., Bergeron, Y., 2011. Quantifying spatial and temporal Holocene carbon accumulation in ombrotrophic peatlands of the Eastmain region, Quebec, Canada. *Global Biogeochemical Cycles* 25, GB2016, doi:10.1029/2010GB003877.
- Vībāns, J., Karušs, J., 2013. Radiolokācijas metodes pielietojums eolo nogulumu pētījumos. *RTU zinātnisko rakstu sērija Materiālzinātne un lietišķā ķīmija* 29, 29-34.
- Vladov, M. L., Starovoytov, A. V., 2004. *Vedenie v georadiolokatsiyu*. Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, Moskva, 153 s.
- Vlads, A., Karušs, J., 2014. Radiolokācijas pētījumi Ķūķu purvā. *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 72. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 338-340.
- Von Hippel, A. R., 1954. *Dielectrics and waves*. Chapman & Hall, London, 304 pp.
- Zhou, Y., Lu, P., Lu, J., Ping Lu, Lu, J., 2012. Application of natural biosorbent and modified peat for bisphenol a removal from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers* 88, 502-508.
- Zolotarev, V., Zelenkov, S., 2009. Zond-12e system evaluation on LCPC test sites (Nantes France). *In. Ģeogrāfija. Ģeoloģija. Vides zinātne. Latvijas Universitātes 67. zinātniskā konference. Referātu tēzes*. Latvijas Universitāte, Rīga, lpp. 266-268.

#### **Nepublicētā literatūra**

- Bush, L. Ya., Alksnitis, R. A., Busha, D. Ya., 1985. *Otchet o predvaritel'noy razvedke torfyanogo mestorozhdeniya Tsenas tirelis v Rizhkom rayone*. KGRE, Riga. Valsts ģeoloģijas fonds nr. 10305., 530 s.
- Khodyrev, V. L., Bogdankova, O. T., Klepatskaya, V. P., 1980. *Otchet o poiskovo – pevizionnukh rabotakh po bolotam Tukumskogo rayona 1978 – 80 g.g.*. Ministerstvo geologii SSSR upravlenie geologii soveta ministrov latviyskoy SSR geologorazvedochnaya ekspeditsiya poiskovo – pazvedochnaya partiya na torf, Riga. Valsts ģeoloģijas fonds nr. 9695., 394 s.
- Kūdras fonds. 1980. Latvijas PSR Kūdras fonds uz 1980. gada 1. janvāri, Rīga. Latvijas PSR Meliorācijas un ūdenssaimniecības ministrija, Latvijas valsts meliorācijas projektēšanas institūts, No 0237., 717 lpp.
- Nobes, D. C., Warner, B. G., 1991. The characterization of bogs using ground penetrating radar. Open File Rep. 5778, Ontario Geological Survey, Ontario, Canada, 306 pp.
- Remotec Applications Inc., 1982. *The use of impulse radar techniques for depth profiling of peat deposits*. NRCC 20982, DSS File No. 2S5R31155-1-2630, National Research Council Canada, Canada, 94 pp.
- Ruks, A., Logins, J., Elperis, T., Rubenis., A., 1967. *Tehniskā atskaite par „Laugas” izmeklēšanas darbiem pakaišu kūdras ieguves vienstadijs projektam Nr. 27/38*. Valsts ģeoloģijas fonds nr. 23142., 7 lpp.
- Sičovs, G., 1998. *Pārskats par kūdras atradņu meklēšanas un revīzijas darbiem Rīgas rajonā*. Valsts ģeoloģijas fonds nr. 11874., 288 lpp.
- Steck, D. A., 2013. *Classical and modern optics*. Studiju materiālu apkopojums. <http://steck.us/teaching>, 352 pp.

Sychev, G., Seglin'sh, V., Alksnitis, R., 1987. *Otchet po teme obobshcheniye rezul'tatov radiolokatsionnogo zondirovaniya pri geologorazvedochnykh rabotakh na torf*. Valsts ģeoloģijas fonds nr. 10546., 147 s.

Zolotarev, V., 2007. *Georadar Zond-12e User's manual*. Riga, Radar Systems Inc., 58 pp.

### **LU ĢZZF karšu pārlūks**

Valsts Ģeoloģijas Dienesta Kvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200000. LU ĢZZF WMS. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv> (atsauce tekstā - LVGD Kvartārģeoloģija)

Valsts Ģeoloģijas Dienesta Pirmskvartāra nogulumu karšu mozaīka mērogā 1:200000. LU ĢZZF WMS. Pieejams <http://kartes.geo.lu.lv> (atsauce tekstā - LVGD Pirmskvartāra)

### **Interneta resursi**

<http://forum.detectation.com/viewforum.php?f=2&sid=362d77a82ab976a29db622368e39100e> skatīts 15.01.2015. (Geophysics forum)

<http://www.laukutikls.lv/zivsaimnieciba/4225-radiolokacijas-metode-paligs-zemudens-grunts-raksturosanai> skatīts 08.09.2014. (Radiolokācijas pētījumi ūdenstilpnēs)