



Viktoria Jaarma

**INTEGREERITUD GNSS SÜSTEEMIDE RAKENDAMISE
VÕIMALUSED RAUDTEE TÖÖDE TEOSTAMISEL**

LÕPUTÖÖ

Logistikainstituut

Raudteetranspordi tehnoloogia ja liikluskorraldus

Juhendaja: Mati Räli

Tallinn 2024

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Viktoria Jaarma, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud.

Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja: Mati Räli /allkirjastatud digitaalselt/

Lõputöö on kaitsmisele lubatud Logistikainstituudi direktori korraldusega

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Viktoria Jaarma

sünnikuupäev: 23.05.2001,

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „INTEGREERITUD GNSS SÜSTEEMIDE RAKENDAMISE VÕIMALUSED RAUDTEE TÖÖDE TEOSTAMISEL“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas 05.01.2024 Viktoria Jaarma /allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1 INTEGREERITUD GNSS-SÜSTEEMIDE ÜLEVAADE	7
1.1 Integreeritud GNSS-süsteemide päritolu.....	7
1.1.1 Tehnoloogia GNSSi taga.....	9
1.1.2 GNSS mõõtmiste selgitus.....	11
1.1.3 RTK kasutamise tehnoloogia	13
2 GNSSI RAKENDUSED TÄNAPÄEVAL	15
2.1 GNSS-tehnoloogia juhtumiuuringud ja edulood	16
2.1.1 Barcelona linnaliikluse optimeerimine.....	16
2.1.2 Täppispõllumajanduse edusammud Ameerika Ühendriikides	17
2.1.3 Hädaolukorrale reageerimine Jaapanis.....	18
2.2 GNSS-tehnoloogia väljakutsed ja piirangud	19
3 KOOLITUS JA TEADLIKKUSE TÕSTMINE GNSS-TEHNOLOOGIA ALAL	23
3.1 Professionaalsed koolitusprogrammid GNSS-tehnoloogia valdkonnas.....	23
3.2 GNSS-tehnoloogia veebipõhised õppeplatvormid	24
4 GNSS-TEHNOLOOGIA TULEVIKUSUUNDUMUSED JA UUENDUSED	26
4.1 Autonoomsed sõidukid ja transport.....	26
4.2 Targad linnad ja infrastruktuur	27
4.2.1 Nutistu ehk asjade interneti ühenduvus.....	28
4.3 Kvant-GNSS täiustatud turvalisuse jaoks.....	30
5 METOODIKA.....	32
5.1 Aegviidu - Tapa jaamavahe I peatee rekonstrueerimise projekt.....	32
5.2 Aegviidu - Tapa - Tartu teelõigu elektrifitseerimisprojekt	33
5.3 Ülemiste jaama infrastruktuuri rekonstrueerimine	35
6 TULEMUSED.....	41
7 JÄRELDUSED.....	43
KOKKUVÕTE	44
SUMMARY	46
VIIDATUD ALLIKAD	49

LÜHENDID

GNSS – Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem

TRANSIT – Ajavahemiku ja järjestikune süsteem

GPS – Globaalne positsioneerimissüsteem

IGS – Rahvusvaheline GNSS-teenistus

IoT – Nutistu ehk Asjade Internet

ITS - Intelligentsed transpordisüsteemid

PPP – Täpne punkti positsioneerimine

RTN – Reaalajas võrk

RTK – Reaalajas kinemaatiline

QKD – turvalisuse kvantvõtmejaotus

QRNG – kvantjuhusliku arvu genereerimine

SISSEJUHATUS

Viimaste aastate kiire tehnoloogia areng on muutnud revolutsiooni erinevates tööstusharudes ning raudtee-ehitus pole erand. Raudtee-ehitus on infrastruktuuri arendamisel kriitiline sektor, kus täpsus, tõhusus ja ohutus on esmatähtsad. Täpse positsioneerimise vajadust raudtee-ehituses ei saa piisavalt rõhutada, kuna see mõjutab otseselt kogu protsessi üldist kvaliteeti, tõhusust ja ohutust. Kuigi traditsioonilised meetodid on oma rolli täitnud, on neil piiranguid, mis takistavad edasist arengut. Traditsioonilised raudteetööde teostamise meetodid, eriti puurimine ja pinnasetööd, puutuvad aga sageli kokku ajakulu ja piiratud täpsusega seotud maa aluste kommunikatsioonide ja takistuste mitte teadmiste väljakutsetega. Tunnistades täpse ja usaldusväärse positsioneerimise olulisust raudteeprojektides, on globaalsete satelliitnavigatsioonisüsteemide (edaspidi GNSS) integreerimine paljutootav lahendus. Selle lõputöö eesmärk on uurida integreeritud GNSS-süsteemide võimalikku rakendamist raudtee-ehituses, püüdes hinnata integreeritud GNSS-süsteemidega seotud eeliseid, võimalusi, väljakutseid ja piiranguid raudteeinfrastruktuuri arendamise valdkonnas.

Mõistes, kuidas GNSS-süsteeme saab raudtee - ehituse erinevates etappides kasutada, välja selgitada, kuidas see tehnoloogia võib aidata kaasa ülesannete spetsifikatsioonile, kontrollimisele ja järelevalvele ning tuua välja teatud väljakutsed ja piirangud. Need väljakutsed hõlmavad tehnoloogilisi piiranguid, signaali häireid, samuti koolituse ja teadlikkuse tõstmise küsimusi.

Töö eesmärkide täitmiseks viidi läbi järgmised tegevused:

- 1) Olemasoleva teadusliku kirjanduse uurimine, uurimisartiklite ja praktiliste juhendite süstemaatiline uurimine, et luua terviklik arusaam integreeritud GNSS-süsteemidest
- 2) Välitööd, mis hõlmavad raudteetööde tegelikku teostamist GNSS-süsteemide abil. Positsioneerimisandmete, mõõtmistulemuste ja töödokumentatsiooni kogumine ja analüüs, et hinnata mõju kvaliteedile ja efektiivsusele.
- 3) Traditsiooniliste meetoditega võrreldi integreeritud GNSS-süsteemide täpsust ja efektiivsust raudteetööde teostamisel.
- 4) Viidi läbi analüüs, et uurida võimalikke väljakutseid ja piiranguid, mis võivad tekkida integreeritud GNSS-süsteemide kasutamisel raudtee-ehitustöödel.

Lõputööl esimeses peatükis keskenduti integreeritud GNSS-süsteemide ülevaatele. Teises peatükis käsitletakse GNSSi rakendused tänapäeval ning väljakutseid ja piiranguid, mis on seotud integreeritud GNSS-süsteemide rakendamisega. See hõlmab tehnoloogiliste piirangute,

signaalihäirete, koolituse ja teadlikkuse tõstmise küsimuste arutamist. Kolmandas peatükis käsitletakse koolitus ja teadlikkuse tõstmine GNSS-tehnoloogia alal. Lõputöö neljandas peatükis hõlmab GNSS-tehnoloogia tulevikusuundumused ja uuendused. Viies peatükk on pühendatud juhtumiuuringutele ja andmete analüüsile, et näidata GNSS-tehnoloogia mõju projekti kvaliteedile ja ajakavadele.

Kokkuvõttes võtab autor kokku kogu lõputöö jooksul käsitletud järeldused ja põhipunktid. Tuues välja integreeritud GNSS-süsteemide eelised ja võimalused raudtee-ehituses, siinkohal täpsuse, efektiivsuse ja täpsemate mõõtmiste paranemine. Lisaks käsitletakse integreeritud GNSS-süsteemide ja traditsiooniliste meetodite võrdlust.

GNSS-süsteemide integreerimine raudtee-ehituses on tänapäeva maailmas väga aktuaalne teema. Nõudlus tõhusate transpordisüsteemide järele ja vajadus täpsete mõõtmiste järele raudtee-ehituses muudavad selle oluliseks fookusvaldkonnaks. GNSS-tehnoloogia kaasamisega on meil potentsiaal parandada raudteeprojektide täpsust ja tõhusust. Lisaks võivad GNSS-süsteemide pakutavad reaajas andme- ja jälgimisvõimalused oluliselt parandada projektijuhtimist. Kuna arenev GNSS-tehnoloogia muutub kättesaadavamaks, on see praktiline lahendus raudtee-ehituse tõhustamiseks. Lisaks muutub ehitustööstuses keset digitaalset ümberkujundamist GNSS-tehnoloogia integreerimine veelgi asjakohasemaks ja väärtuslikumaks.

1 INTEGREERITUD GNSS-SÜSTEEMIDE ÜLEVAADE

1.1 Integreeritud GNSS-süsteemide päritolu

GNSSi päritolu ulatub tagasi 1950. aastatesse, mil navigeerimise täpsuse parandamiseks töötati välja raadiopõhised maapealsed süsteemid. Esimene satelliidipõhine navigatsioonisüsteem oli TRANSIT (Joonis 1), mille töötas välja USA merevägi 1960. aastate alguses allveelaevade täpse asukoha määramiseks. Kuid alles 1970. aastatel hakkas transiidisüsteem tsiviilkäibes tööle. Teine märkimisväärne areng sel perioodil oli esimese geostatsionaarse satelliidi orbiidile laskmine 1967. aastal, mis võimaldas stabiilsemat ja pidevat positsioneerimist. [1]

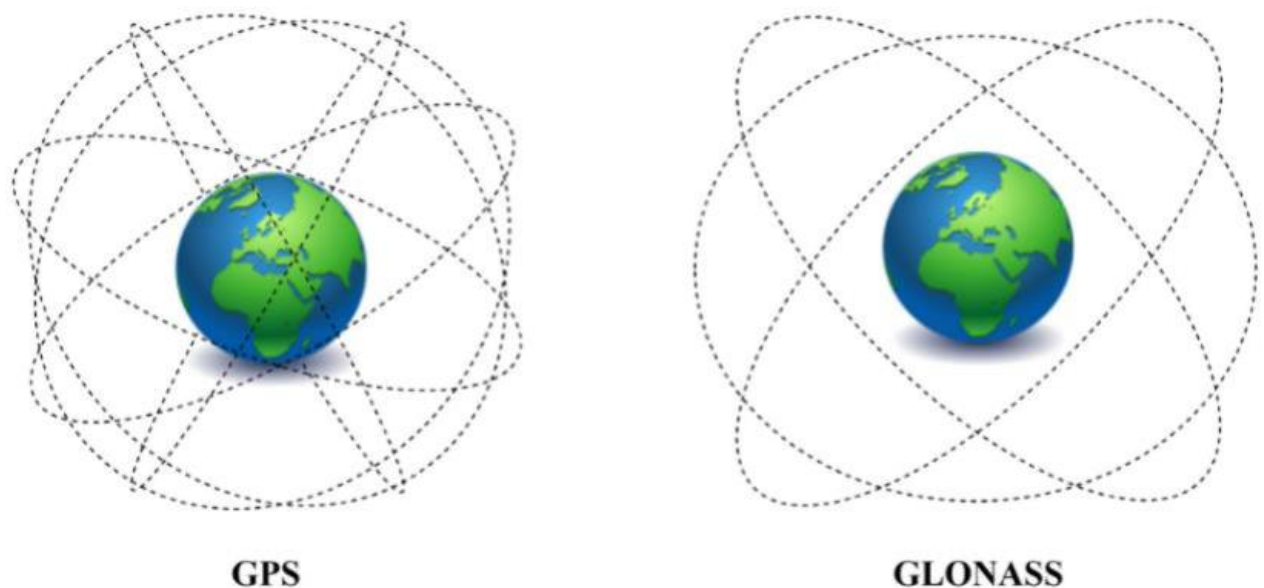


Joonis 1. TRANSIT-satelliit [1]

1973. aastal algatas USA kaitseministeerium globaalse positsioneerimissüsteemi (edaspidi GPS) väljatöötamise – satelliidipõhise navigatsioonisüsteemi, mis suudab pakkuda täpset positsioneerimis-, navigatsiooni- ja ajastusteavet kogu maailmas. Esimene GPS-satelliit lasti orbiidile 1978. aastal ja 1990. aastate alguseks sai süsteem tsiviilkasutuseks täielikult töökorras. Algselt kasutati GPS-i peamiselt sõjalistel eesmärkidel, kuid selle laialdane kättesaadavus ja juurdepääsetavus sillutas teed tsiviilrakendustele erinevates valdkondades, nagu transport, möödistamine ja kaardistamine. Teised riigid järgisid USA eeskujul ja töötasid välja oma GNSS-süsteemid. Venemaa GLONASS hakkas tööle

1990ndatel ja Euroopa Galileo süsteem hakkas tööle 2010ndatel. Hiina käivitas oma BeiDou süsteemi 2020. aastal, muutes selle töötavate GNSS-süsteemide loendi viimaseks täienduseks. Tänapäeval eksisteerivad koos mitu GNSS-süsteemi, mis võimaldab kasutajatel saada signaale erinevatest orbiitidest, et parandada positsioneerimise täpsust ja usaldusväärsust. [1]

GNSS - süsteemid kujutavad endast Maa ümber tiirlevate satelliitide orbiite, mis on ühiselt loodud täpse asukoha määramise ja navigatsiooniteabe pakkumiseks (Joonis 2). Tuntuim GNSS sisaldab GPS-i, Glonassi, Galileo ja BeiDou. Need süsteemid töötavad väljastades signaale, mida võtavad vastu maapealsed GNSS-vastuvõtjad, mis seejärel töötlevad neid signaale täpse asukohateabe arvutamiseks. [2]



Joonis 2. GPS- ja GLONASS-satelliitide orbiitide võrdlus. GPS-satelliidid paiknevad kuuel ja GLONASS-satelliidid kolmel orbiidil [1]

Raudteetööde kontekstis on GNSS-tehnoloogia integreerimine muutnud georuumilise positsioneerimise ja juhtimise lähenemisviisi. Satelliidisignaali sünergiline sidumine maapealse tehnoloogiaga on toonud kaasa integreeritud GNSS-süsteemide, kus täpsusel ja reaajas andmetel on keskne roll. [3]

Integreeritud GNSS-süsteemide üks põhikomponente on GNSS-vastuvõtja. Need keerukate algoritmidega varustatud vastuvõtjad koguvad signaale korraga mitmelt satelliidilt. Erinevate satelliitide signaalide kasutamine suurendab positsioneerimisandmete täpsust ja usaldusväärsust. Kaasaegsed GNSS-vastuvõtjad, näiteks need, mis toetavad mitme orbiiti ja mitme sagedusega

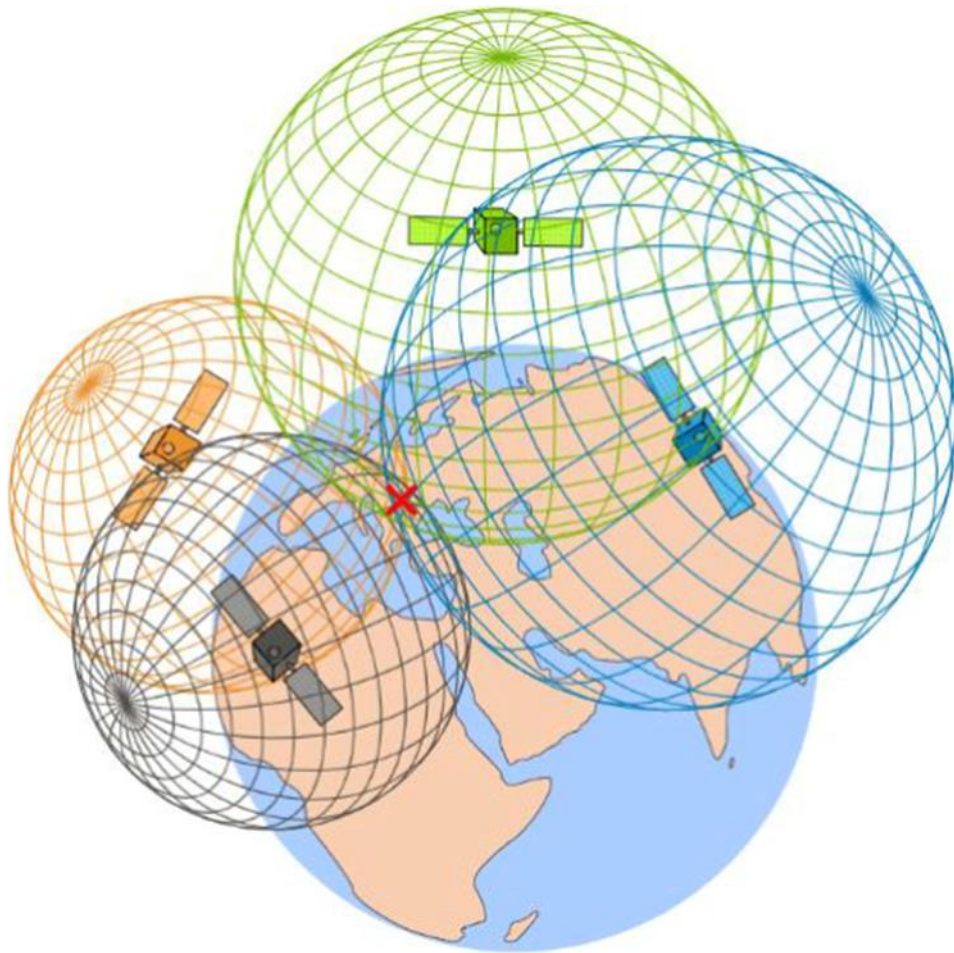
võimeid, aitavad veelgi parandada jõudlust rasketes keskkondades, nagu linnakanjonid või signaalitakistustega alad. [2]

1.1.1 Tehnoloogia GNSSi taga

GNSSi taga olev tehnoloogia on keeruline ja hõlmab mitmeid teadusvaldkondi, sealhulgas astronoomiat, füüsikat, matemaatikat ja elektroonikat. GNSS-tehnoloogia töötab trilateratsiooni põhimõttel, mille puhul kasutaja asukoht arvutatakse kasutaja ja vähemalt nelja satelliidi orbiidis oleva satelliidi vahelise kauguse põhjal.

Satelliidi orbiidid on globaalsete satelliitnavigatsioonisüsteemide alusinfrastruktuur, mis hõlmab Maa ümber tiirlevate omavahel ühendatud satelliitide võrke. Need täpsete aatomkelladega varustatud satelliidid on paljude navigatsiooni- ja positsioneerimisrakenduste selgrooks. Peamised GNSS-i orbiidid, nagu USA GPS, Venemaa GLONASS, Euroopa Galileo ja Hiina BeiDou, koosnevad paljudest satelliitidest, mis teevad koostööd, et tagada ulatuslik globaalne leviala. Need satelliidid edastavad Maa pinnale signaale, mis sisaldavad täpset ajastust ja asukohateavet. Mitme satelliidi signaalide samaaegse vastuvõtmise kaudu saavad kasutajad, alates igapäevastest nutitelefonidest kuni spetsiaalsete seadmeteni, täpselt määrata oma asukoha, kasutades protsessi, mida nimetatakse trilateratsiooniks (Joonis 3). Satelliidi orbiitide hajutatud olemus tagab katkematu levi isegi siis, kui Maa pöörleb. Mitmele satelliidile omane koondamine suurendab GNSSi täpsust ja töökindlust. Signaali takistuste või häiretega stsenaariumide korral saavad kasutajad siiski vastu võtta signaale alternatiivsetelt satelliitidelt, säilitades seeläbi asukohaandmete täpsuse. Orbiitide satelliidid järgivad kindlaid orbiite, mis on strateegiliselt kavandatud optimeerima oma asukohti tõhusa ülemaailmse katvuse jaoks. Need orbiidid tagavad, et igal ajal on Maa mis tahes punktist nähtav piisav arv satelliite. Satelliidi orbiidid kujutavad endast hoolikalt korraldatud võrku, mis võimaldab GNSS-tehnoloogial edastada täpset ja usaldusväärset asukohateavet. Nende koostise, funktsionaalsuse,

pideva katvuse, täpsuse ja satelliidi orbiitide põhjalik mõistmine on oluline selleks, et hinnata GNSSi sujuvaid ja kõikehõlmavaid navigeerimisvõimalusi. [1]



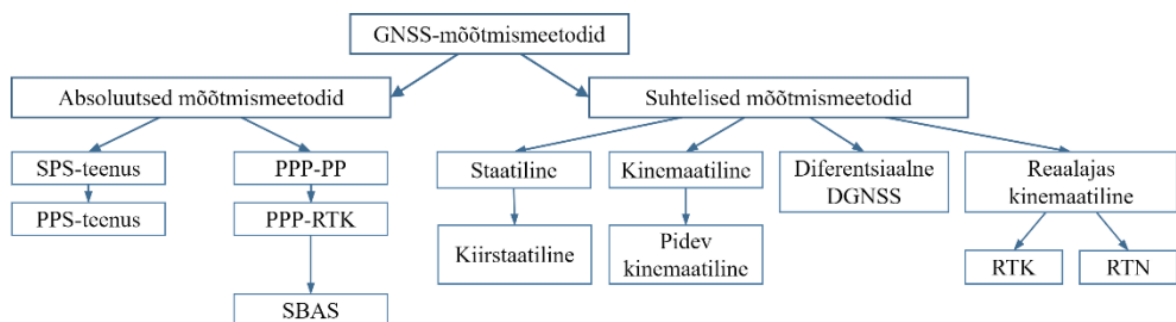
Joonis 3. Absoluutse asukohamääramise põhimõte nelja satelliidini mõõdetud pseudo-kauguste abil. Vastuvõtja asukoht maakera pinnal on tähistatud ristikesega. [1]

Satelliitide edastatavad signaalid on moduleeritud navigatsiooniandmetega, sealhulgas efemeriiidi andmetega, almanahhi andmetega ja ionosfääri viivitusega. Efemeriiidi andmed annavad teavet satelliidi asukoha kohta, almanahhi andmed aga teiste orbiidi satelliitide kohta. Ionosfääri viivitus tekib siis, kui signaal aeglustub, kui see läbib ionosfääri, Maa atmosfääri kihti, mis sisaldab elektriliselt laetud osakesi. Kasutaja asukoha arvutamiseks mõõdab vastuvõtja aega, mis kulub signaali liikumiseks satelliidilt vastuvõtjasse. Seejärel määrab see valguse kiiruse abil satelliidi ja vastuvõtja vahelise kauguse. Kui kaugused vähemalt nelja satelliidini on teada, saab süsteem iga satelliidi ümbritsevate sfäärade ristumiskohtade põhjal lahendada kasutaja asukoha. [4]

1.1.2 GNSS mõõtmiste selgitus

GNSS-mõõtmisi, mis aitavad määrata meie asukohta, on kahte peamist tüüpi: absoluutne ja suhteline positsioneerimine (Joonis 4). Absoluutne positsioneerimine hõlmab ühe GNSS-vastuvõtja, näiteks nutitelefoniga kasutamist, et saada eraldiseisev koordinaat. Selles režiimis ei rakendata GNSS tugijaamade parandusi. See on lihtne lähenemisviis, mis sobib rakendustele, kus mõõdukas täpsus on vastuvõetav.

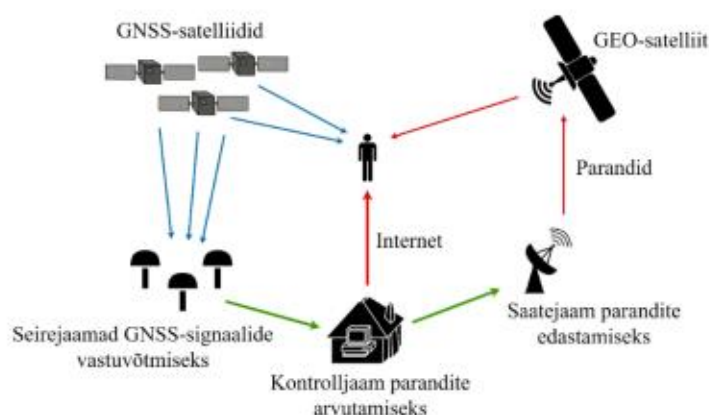
Teisest küljest on suhteline positsioneerimine keerukam tehnika, mis on tuntud oma suurema täpsuse poolest. See meetod hõlmab parandusi tugijaamast, milleks võib olla kas teadaolevasse punkti paigutatud GNSS-vastuvõtja või pidevalt töötav GNSS-i tugijaam. Rakendades parandusi vastuvõtja ja satelliidi vahelisele vektorile, minimeeritakse vead, mis on põhjustatud sellistest teguritest nagu satelliidi kellad ja atmosfääritingimused. Selle tulemuseks on täpsemad ja usaldusväärsemad mõõtmised, muutes suhtelise positsioneerimise eelistatud valikuks rakenduste jaoks, mis nõuavad suurt täpsust. [1]



Joonis 4. GNSS-mõõtmismeetodite jagunemine [1]

Igapäevaste rakenduste jaoks, nagu asukoha kuvamine digitaalkaardil, võib piisata mõnemeetrisest nutitelefoni saadud täpsusest. Kuid selliste tegevuste jaoks nagu maamõõtmine, mis nõuab

detsimeetritaseme täpsust, kasutatakse suhtelise positsioneerimise või täpse punkti positsioneerimise (PPP) meetodeid, mis on kohandatud töö spetsiifikale. Riiklike võrkude ja maakoore liikumist hõlmavate uuringute valdkonnas tulevad mängu staatilised GNSS-i mõõtmised. Need mõõtmised võimaldavad määrata punkti koordinaate või aja jooksul muutuvaid koordinaate millimeetri täpsusega (Joonis 5). [1]



Joonis 5. PPP-RTK süsteemi tööpõhimõte [1]

Kinemaatilised mõõtmised, nagu reaajas kinemaatika (RTK) või reaajas võrk (RTN), on igapäevaseks kasutamiseks tavalisemad, pakkudes umbes $\pm 1\text{--}5$ cm täpsust, mis sobivad näiteks maamõõtmiseks (Joonis 6). GNSS-mõõtmiste keerukuse mõistmine on eriti oluline rakendustes, kus täpsus, tõhusus ja usaldusväärsus on ülimalt tähtsad. See hõlmab selliseid kontekste nagu raudteetööd, kus täpne positsioneerimine on ehitusprojektide kvaliteedi, tõhususe ja ohutuse tagamiseks ülioluline. Integreeritud GNSS-süsteemide uurimine sellistes rakendustes muutub nende täieliku potentsiaali vallandamiseks hädavajalikuks, lahendades väljakutseid ja optimeerides eeliseid. [1]

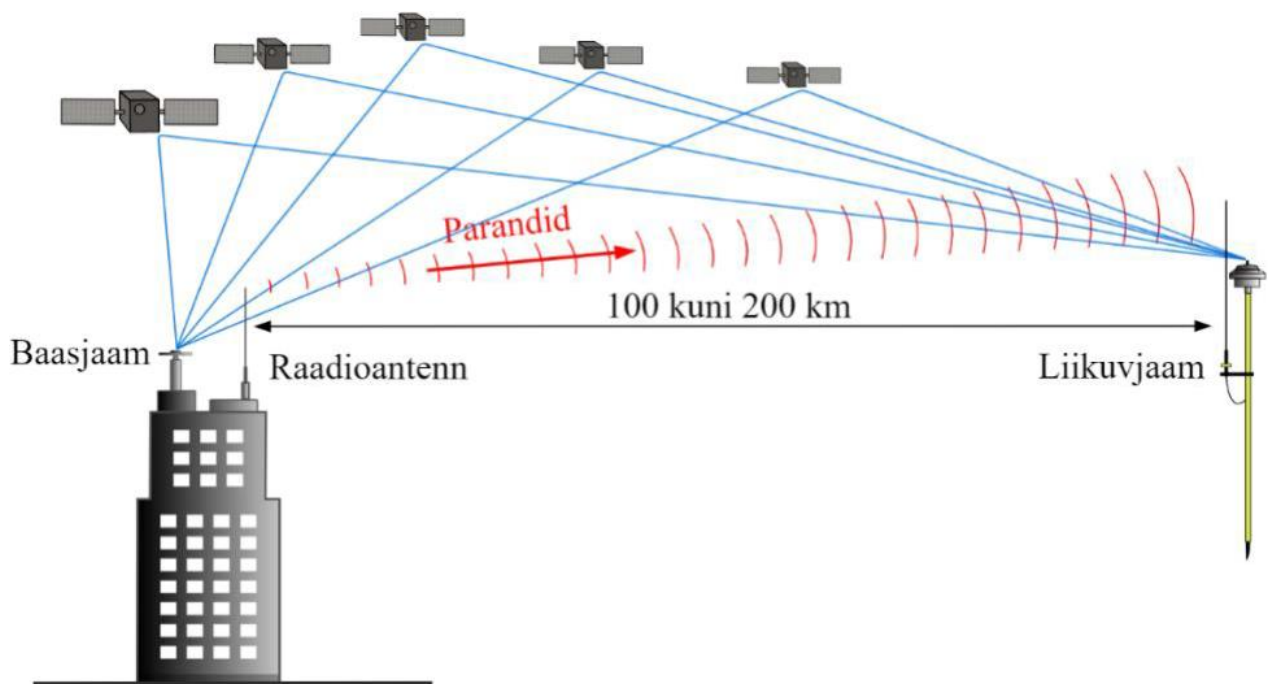
Mõõtmismeetod	Asukoha- määramise täpsus (cm) ¹	Asukohamäära- mise suhteline täpsus (ppm) ²	Kasutusvaldkond ³	Seade ⁴
Absoluutne asu- kohamäärang	100–500	–	Tavakasutaja, matkamine, navi- geerimine	Ühesageduslik
Reaajas PPP	4–10	–	Navigatsioon	Kahe- ja ena- masageduslik
Staatiline PPP	1	–	Maamõõtmine	Kahe- ja ena- masageduslik
SBAS	50–300	–	GIS, täppis põllu- majandus	Ühesageduslik
DGNSS	50–100	1	Navigatsioon, GIS, täppis põllu- majandus	Ühesageduslik
RTK/RTN	1–5	1–2	Maamõõtmine, droonid, GIS	Kahe- ja ena- masageduslik
Kinemaatiline	1–3	1	Aerofotogeodee- sia, droonid	Kahe- ja ena- masageduslik
Staatiline	0,3–1	0,5	Geodeesia, teadus	Kahe- ja ena- masageduslik
Kiirstaatiline	1–2	1	Maamõõtmine	Kahe- ja ena- masageduslik

Joonis 6. GNSS-mõõtmismeetodid, nende täpsus ja rakendatavus [1]

1.1.3 RTK kasutamise tehnoloogia

Real-Time Kinematic (edaspidi RTK) tehnoloogia on keerukas tehnika, mida kasutatakse satelliitnavigatsioonisüsteemides, eriti GPS-is, mis suurendab oluliselt asukohaandmete täpsust reaajas. Selle tehnoloogia keskmes on RTK GNSS – vastuvõtja (edaspidi liikuvjaam), seade mis on loodud RTK eeliste ärakasutamiseks ülitäpse positsioneerimisrakenduste jaoks.

Liikuvjaam on kaasaskantav seade, mis viiakse konkreetsesse piirkonda, kus on vaja täpset positsioneerimist. Tugijaam arvutab pidevalt tegeliku ja vaadeldud positsioonide erinevust, genereerides parandusandmeid, mis seejärel edastatakse reaajas liikuvjaam. Need parandusandmed on olulised asukoha täpsustamisel sentimeetri täpsusega, kui see liigub määratud piirkonnas (Joonis 7). [1]



Joonis 7. RTK liikuvjaama töötamise põhimõte [1]

Tõhusaks toimimiseks luuakse sideühendus baasjaama ja seade vahel. Seda suhtlust saab hõlbustada erinevate vahendite, näiteks raadioside, Interneti või muude sobivate kanalite kaudu, olenevalt konkreetsest kasutatavast RTK-süsteemist. Praktilistes rakendustes leiavad RTK liikuvjaamad laialdast kasutust sektorites, mis nõuavad erakordselt ülitäpset positsioneerimist. Nende hulka kuuluvad mõõdistamine, kaardistamine, põllumajandus, ehitus ja navigatsioon. Näiteks ehitustööstuses mängivad need keskset rolli sellistes ülesannetes nagu liigutamine, kaevamine ja seire. Nende pakutav võrratu täpsus tagab, et ehitustegevus on täpselt kooskõlas projekti

projekteerimisspetsifikatsioonidega. RTK toimimiseks peab GNSS-süsteemil olema spetsiaalne riistvara ja keerukas tarkvara. Riistvara vastutab satelliidisignaali vastuvõtmise ja andmete kogumise eest. Tarkvara on see, mis muudab need andmed mõistlikuks ja aitab spetsialistidel neid tõhusalt kasutada. [1]

Näiteks RTK liikuvjaamaga kasutatavat tarkvara, nagu Leica Captivate Leica GNSS seadmete jaoks ja Trimble Access Trimble GNSS vastuvõtjate jaoks, nimetatakse tavaliselt geosüsteemi tarkvaraks. See tarkvara mängib otsustavat rolli, võimaldades spetsialistidel GNSS-i andmeid reaalsajas näha, analüüsida ja mõista. Leica Captivate pakub kasutajasõbralikku liidest reaalsajas andmete kogumiseks, visualiseerimiseks ja analüüsimiseks. See sisaldab kaardistamistöööriistu, mõõdistusvõimalusi ja toetab integreerimist teiste Leica instrumentidega. [5]

Samamoodi on Trimble Access välitarkvaralahendus, mis on mõeldud kasutamiseks Trimble GNSS-vastuvõtjatega, sealhulgas RTK liikuvjaamaga. See hõlbustab reaalsajas andmete kogumist, mõõdistamist, märgistamist ja andmete hooldamist. Trimble Access pakub ka ühilduvust arvutipõhise disaini (CAD) tarkvaraga, lihtsustades andmeedastust töömaa ja kontori vahel. [6]

Need tarkvaralahendused täiendavad seadmeid, laiendades nende andmete kogumise ja analüüsimise võimalusi. Tarkvara ühilduvuse ja funktsionaalsuse kohta kõige täpsema ja ajakohaseima teabe saamiseks peaksid kasutajad lugema tootjate esitatud spetsiifilist dokumentatsiooni. RTK tehnoloogia eelised seisnevad selle võimes pakkuda sentimeetri täpsust, reaalsajas korrigeerimisvõimalusi ja suuremat efektiivsust täpset positsioneerimist nõudvate ülesannete puhul. Siiski on oluline arvestada RTK tõhusust mõjutavate teguritega, nagu tugijaama kvaliteet, atmosfääritingimused ja võimalikud takistused, mis võivad mõjutada satelliidi signaale. RTK liikuvjaam on väga väärtuslik tööriist stsenaariumides, kus täpsus on ülimalt tähtis. Selle reaalsajas korrigeerimisvõimalused koos tarkvaraga sujuva integreerimisega muudavad selle asendamatuks vahendiks erinevates rakendustes, kus täpsus pole mitte ainult nõue, vaid ka edu saavutamise oluline tegur. [1]

2 GNSSI RAKENDUSED TÄNAPÄEVAL

GNSS-tehnoloogia pakub laia valikut rakendusi paljudes tööstusharudes ja valdkondades. Peamiselt kasutatakse GNSS-i navigeerimiseks, positsioneerimiseks ja aja määramiseks, kuid see mängib olulist rolli ka muudes valdkondades, nagu täppispõllumajandus, mõõdistamine, kaardistamine, ajastuse sünkroonimine ning otsingu- ja päästeoperatsioonid. Tehnoloogia laialdane levik on oluliselt mõjutanud meie navigeerimist, teabe kogumist ja erinevaid tegevusi. Üks selle peamisi rakendusi on igapäevakasutajatele mõeldud navigatsioonisüsteemides. GNSS-i integreerimine nutitelefonidesse ja autode navigatsioonisüsteemidesse võimaldab inimestel määrata oma täpse asukoha, planeerida marsruute ja saada reaajas navigeerimisjuhiseid. See üldlevinud funktsioon on muutnud inimeste reisimist, pakkudes mugavust ja tõhusust. [1]

Navigatsiooni kasutatakse erinevates transpordiliikides, sealhulgas lennu-, mere-, raudtee- ja maanteetranspordis. Lennundus tugineb navigeerimisel ja juhendamisel suuresti GNSS-ile. Lennukid kasutavad GNSS-signaale täpselt positsioneerimiseks lendude ajal, parandades üldist ohutust ja tõhusust. Süsteemi kasutamine selles valdkonnas on eriti kriitiline, kuna see aitab pilootidel navigeerida isegi halbade ilmastikutingimuste korral. Samuti on merenavigatsioonis kasutatud nimetatud tehnoloogiat, mis parandab laevade asukoha määramise ja avamerel navigeerimise täpsust. GNSS-i saab kasutada ka maa ja infrastruktuuri mõõdistamise ja kaardistamise jaoks, kõrguste ja kauguste täpselt määramiseks, muutes mõõdistusprotsessi sujuvamaks ning parandades kaardistamise ja georuumiliste andmete üldist täpsust. Täppispõllumajanduses mängib eeltoodud tehnoloogia põllumajandustavade optimeerimisel üliolulist rolli. GNSS-vastuvõtjatega varustatud traktorid ja muud põllumajandusmasinad suudavad põldudel täpselt navigeerida, hõlbustades selliseid ülesandeid nagu istutamine, saagikoristus ja pritsimine. See mitte ainult ei suurenda tõhusust, vaid vähendab ka ressursside kasutamist, aidates kaasa säästvatele põllumajandustavadele. Telekommunikatsioonis GNSS-i kasutatakse ka ajastamise sünkroonimiseks telekommunikatsioonivõrkudes, toetades erinevaid rakendusi, nagu mobiilside, Interneti-juurdepääs ja satelliitside. Otsingu- ja päästeoperatsioonid GNSS-tehnoloogia abistab otsingu- ja päästeoperatsioone, pakkudes kriitilist teavet hädasignaali asukoha ja mõjutatud isiku kohta. Teadusuuringute valdkond saab kasu erinevate Maa protsesside uurimisel. Selle andmeid kasutatakse tektooniliste plaatide liikumise jälgimiseks, merepinna muutuste uurimiseks ja maakoore deformatsioonide analüüsimiseks. See aitab teadlastel saada väärtuslikku teavet geoloogiliste nähtuste ja kliimaga seotud muutuste kohta. Logistika ja tarneahela juhtimise valdkonnas võimaldab süsteem saadetiste täpset jälgimist. Autopargi haldussüsteemid kasutavad marsruutide

optimeerimiseks, kohaletoimetamise tõhususe suurendamiseks ja kütusekulu vähendamiseks, aidates kaasa kulude kokkuhoiule ja keskkonnasäästlikkusele. GNSSi rakendused laienevad ehitustööstusele, kus täpne positsioneerimine on projekti planeerimisel ja teostamisel ülioluline. GNSS-tehnoloogia hõlbustab raskete masinate, näiteks ekskavaatorite ja tornkraana tõstevankri täpset juhtimist, parandades pinnase teisaldamise ja ehitustegevuse täpsust. [1]

GNSS-süsteemide integreerimine raudtee-ehitusprojektidesse kuulutab uut tõhususe ja täpsuse ajastut. See käsitleb traditsioonilisi väljakutseid, mis on seotud töömahukate mõõdistusmeetodite ja piiratud täpsusega. Pidevate ja reaajas positsioneerimisandmete pakkumisega pakuvad integreeritud GNSS-süsteemid tavapäraste tehnikatega võrreldes märkimisväärset edu. See täiustatud täpsus ja tõhusus on kriitilise tähtsusega raudteeehituse erinevates aspektides, sealhulgas marsruudi planeerimisel, geodeetilistel mõõtmistel, rööbastee paigaldamisel ja mullatöödel. GNSS-tehnoloogia sujuv integreerimine nendesse etappidesse optimeerib ehitusprotsesse, mille tulemusel paraneb projekti kvaliteet ja väheneb ajakava.

2.1 GNSS-tehnoloogia juhtumiuuringud ja edulood

Tegelike rakenduste ja edulugude uurimine on ülimalt oluline, et mõista globaalsete satelliitnavigatsioonisüsteemide tehnoloogia käegakatsutavat mõju erinevates valdkondades. Juhtumiuuringud annavad ülevaate sellest, kuidas GNSS on tööstusharusid muutnud, protsesse täiustanud ning navigeerimise ja positsioneerimise edulugudele kaasa aidanud.

2.1.1 Barcelona linnaliikluse optimeerimine

Hispaanias asuvas Barcelona linnas on GNSS-tehnoloogia kujunenud linnaplaneerimise nurgakiviks, mis mõjutab oluliselt infrastruktuuri arengut ja optimeerib selle elanike liikuvust. GNSS-i andmete strateegiline integreerimine linna planeerimisraamistikku on toonud kaasa liiklusvoo, ühistranspordi tõhususe ja üldise linnaliikluse kogemuse märkimisväärse paranemise. [7]

GNSS-tehnoloogia üks peamisi rakendusi Barcelonas on ühistranspordi marsruutide optimeerimine. Linna transpordiamet on varustanud bussid ja trammid GNSS-vastuvõtjatega, mis võimaldab nende asukohta ja liikumist täpselt reaajas jälgida. Seda hulga andmeid analüüsitakse hoolikalt, et tuvastada transpordisüsteemi ebatõhusus ja kitsaskohad. GNSS-i teadmisi kasutades on linnaplaneerijad ja transpordiasutused teinud teadlikke otsuseid busi- ja trammiliinide täiustamiseks. Ummikukollete väljaselgitamise, strateegiliste ümbersuunamismeetmete rakendamise ja sõiduplaanide kohandamisega on linn saavutanud sujuvama liiklusvoo ja oluliselt vähendanud

reisijate ooteaegu. Tulemuseks on kõrgendatud ühistranspordikogemus, mis on kooskõlas linnaelanike muutuvate vajadustega. GNSS-tehnoloogia integreerimine Barcelonas on ületanud staatilise transpordiplaneerimise, võimaldades rakendada dünaamilisi liiklusjuhtimissüsteeme. GNSS-toega sõidukitelt kogutud reaajas andmed on aluseks liikluse levialade tuvastamisel. Vastuseks sellele dünaamilisele teabele saavad liiklasutused koheselt reguleerida liikluse märke, leevendades sellega ummikuid tiipsetel. See kohanduv lähenemine tagab optimaalse liiklusvoo isegi ettearvamatu linnadünaamika korral. Barcelona GNSS-tehnoloogia kasutamine ulatub kaugemale liikuvate sõidukite valdkonnast, et lahendada üks linnaprobleemidest – parkimise haldamine. Linn on rakendanud nutikaid parkimissüsteeme, mis kasutavad GNSS-i, et suunata autojuhid vabadele parkimiskohtadele. GNSS-iga integreeritud mobiilirakendused pakuvad autojuhtidele reaajas teavet parkimiskohtade saadavuse ja hindade kohta. See ennetav lähenemine vähendab parkimiskohtade otsimisele kuluvat aega, minimeerides tõhusalt liikluse ummikuid ja aidates kaasa üldisele linnaliikluse kogemusele. [7]

2.1.2 Täppispõllumajanduse edusammud Ameerika Ühendriikides

GNSS-tehnoloogia integreerimine on Ameerika Ühendriikide põllumajanduses toonud sisse uue ajastu, kujundades täppispõllumajanduse tavasid ja suurendades märkimisväärselt ressursside haldamise tõhusust. Täppispõllumajanduse valdkonnas on GNSS-tehnoloogia traditsioonilised põlluharimismeetodid alates 2000. aastate algusest uuesti määratlenud. GNSS-toega seadmed, sealhulgas traktorid ja kombainid, sisaldavad nüüd täiustatud navigatsioonisüsteeme, mis võimaldavad põllul täpselt navigeerida. See täpsusaste on eriti oluline selliste tegevuste puhul nagu istutamine, kus seemnete paigutamine mõjutab oluliselt põllukultuuride arengut. GNSS-i oluline eelis täppispõllumajanduses seisneb selle võimes optimeerida ressursside kasutamist. Reaajas andmed mulla koostise, niiskustaseme ja põllukultuuride tervise kohta annavad põllumeestele võimaluse teha ressursside kasutamise kohta teadlikke otsuseid. Kohandades väetiste ja pestitsiidide jaotuse täpselt põllukultuuride spetsiifiliste vajaduste alusel, saavad põllumehed saavutada suuremat saaki, minimeerides samal ajal keskkonnamõju. GNSS-tehnoloogia pakub põllumeestele reaajas jälgimisvõimalusi, võimaldades dünaamiliselt reageerida muutuvatele tingimustele. Näiteks kui põllul ilmnevad ebapiisava niiskuse tõttu stressi tunnused, saab GNSS-iga varustatud niisutussüsteeme konkreetse piirkonna jaoks täpselt kasutusele võtta, vältides sellega tarbetut veetarbimist ja säästes ressursse. Peale põldude on täppispõllumajandus alates 2010. aastatest toonud märkimisväärselt majanduslikku kasu. Põllumajandustootjad kogevad sisendite, sealhulgas kütuse, väetiste ja vee kulude kokkuhoidu, mis suurendab põllumajandustegevuse majanduslikku

elujõulisust. Samal ajal aitab see optimeeritud ressursikasutus kaasa keskkonnasäästlikkusele, vähendades põllumajanduse ökoloogilist jalajälge. Vaatamata GNSS-tehnoloogia ilmselgele edule täppispõllumajanduses 2010. aastatel, on teatud väljakutsed takistanud selle laialdast kasutuselevõttu. Üks peamisi takistusi on olnud algsed kapitaliinvesteeringud, mida põllumajandustootjad vajavad GNSS-i toega seadmete oma tegevustesse integreerimiseks. Täppispõllumajandustehnoloogiate ostmise ja rakendamisega seotud kulud on olnud takistuseks väiksematele ja piiratud ressursiga taludele. Veelgi enam, tehnoloogia keerukus on toonud kaasa järsu õppimiskõvera paljudele põllumeestele, eriti neile, kes ei pruugi olla kaugelt kokku puutunud täiustatud digitaalsete tööriistadega. Tehnoloogiline kirjaoskus on olnud võtmetegur, mis mõjutab kasutuselevõtu määra, kuna põllumehed peavad mõistma, kuidas tõhusalt tõlgendada ja kasutada GNSS-süsteemide pakutavaid reaalaajas andmeid. Tulevikuväljavaadete osas peaksid GNSS-tehnoloogia jätkuvad edusammud ja põllumajandustootjate teadlikkuse suurenemine neid väljakutseid leevendama. Kuna kulud vähenevad ja kasutajasõbralikud liidesed muutuvad levinumaks, suureneb kasutuselevõtu määr tõenäoliselt. Lisaks võivad haridusalgatused ja koolitusprogrammid mängida olulist rolli põllumajandustootjate tehnoloogilise kirjaoskuse parandamisel, võimaldades neil GNSS-tehnoloogiat tõhusamalt kasutada. [8]

2.1.3 Hädaolukorrale reageerimine Jaapanis

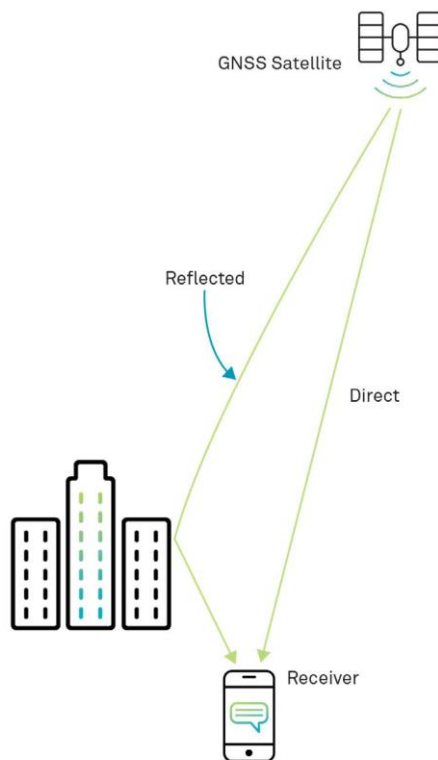
GNSS-tehnoloogia kasutuselevõtt hädaolukordadele reageerimiseks Jaapanis ilmnes 2010. aastatel. Tehnoloogia, mis on üles ehitatud keerukale satelliitide, maapealsete jaamade ja kasutajaseadmete võrgule, mängis kesket rolli riigi valmisoleku ja loodusõnnetuste (nt maavärinad, tsunamid ja taifuunid) reageerimise suurendamisel. Üks GNSSi peamisi rakendusi Jaapani hädaolukordadele reageerimisel seisneb selle täpse kaardistamise võimes. Looduskatastroofide puhkemise ajal pakuvad GNSS-i toega seadmed reaalaajas asukohaandmeid, aidates kaasa mõjutatud piirkondade täpsele kaardistamisele. See täpne georuumiline teave aitab kiiresti tuvastada katastroofist mõjutatud alasid, määrata evakuatsioonimarsruute ja optimeerida ressurside jaotamist. GNSS-tehnoloogiast tuletatud reaalaajas asukohaandmed on osutunud otsingu- ja päästeoperatsioonide valdkonnas muutlikuks. GNSS-toega seadmetega varustatud päästetöötajad suudavad täpselt kindlaks teha hätta sattunud isikud, mis tingib kiirema reageerimisaja ja tõhusamate evakueerimisprotseduuride. See on olnud eriti oluline olukordades, kus aeg on ülioluline, näiteks maavärinate või üleujutuste ajal. Arvukad juhtumiuuringud toovad esile GNSSi käegakatsutava kasu hädaolukordadele reageerimisel. Näiteks 2011. aasta Suure Ida-Jaapani maavärina järel mängis GNSS-tehnoloogia päästetööde koordineerimisel ja ressurside tõhusal suunamisel enim abi vajavatesse piirkondadesse üliolulist

rolli. Reaalajas paiknevad asukohaandmed tagasid, et hädaabimeeskonnad said navigeerida keerulisel maastikul ja jõuda kiiresti mõjutatud kogukondadeni. Jaapani pühendumus GNSS-tehnoloogia võimendamisele katastroofide ohjamisel on pidev protsess. Pidevad edusammud GNSS-tehnoloogias, sealhulgas täiustatud täpsus ja täiustatud andmeanalüütika, aitavad kaasa riigi suutlikkusele kohaneda ja tõhusalt reageerida muutuvatele hädaolukorra stsenaariumidele. [9]

2.2 GNSS-tehnoloogia väljakutsed ja piirangud

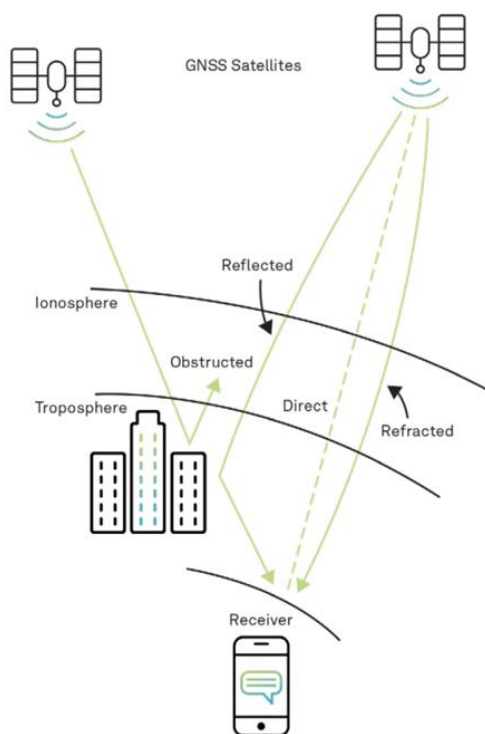
GNSS-tehnoloogia on muutnud revolutsiooni erinevates tööstusharudes muutes selle täpsust mitmesuguste rakenduste lahutamatuks osaks, alates navigeerimisest ja kaardistamisest kuni katastroofihalduse ja põllumajanduseni. Kuid nagu iga tehnoloogiline edusamm, on ka GNSSi laialdane kasutuselevõtt ja rakendamine silmitsi oluliste väljakutsete ja piirangutega. Nende takistuste edukas käsitlemine on GNSS-tehnoloogia potentsiaali täielikuks ärakasutamiseks eri valdkondades ülioluline.

Üks oluline väljakutse on signaali summutamine linnakeskkonnas. Kõrged hooned ja muud ehitised võivad takistada GNSS-signaale, põhjustades signaali mitmeteelisi vigu ja vähendades täpsust. See nähtus põhjustab positsioneerimisandmete ebatäpsusi, kui signaalid liiguvad linnamaastikul, võideldes peegelduste, murdumise ja füüsiliste takistustega, mis takistavad satelliidisignaali sujuvat vastuvõtmist. Kui signaalid läbivad linnapilti, kohtavad nad peegeldavaid pindu, nagu klaasfassaadid, betoonkonstruktsioonid ja metallpinnad. Need peegeldused tekitavad mitu signaaliteed (Joonis 8), mis viivad variatsioonideni, mis seavad kahtluse alla täpse positsioneerimise. Mitmeteeliste efektide leevendamiseks on vaja keerukaid signaalitöötlusalgoritme, mis suudavad eristada otseseid signaale nende peegeldunud analoogidest. Autentsete signaalide tuvastamine keset linnasignaali dünaamikat parandab GNSS-vastuvõtjate täpsust. Signaali blokeerimisega tegelemine nõuab pidevat uurimistööd uuenduslike antennide, täiustatud signaalitöötlustehnikate ja alternatiivsete sageduste alal. Nende püüdluste eesmärk on leevendada signaali blokeerimise mõju linnakeskkonnas, kus arhitektuuriline mitmekesisus kujutab endast ainulaadset väljakutset GNSS-i täpsuse säilitamisel. GNSS-signaalid on vastuvõtlikud tahtlikele häiretele või tahtmatule segamisele, mis mõjutab asukohateabe täpsust ja usaldusväärsust. See tekitab turvaprobleeme kriitilistes rakendustes, nagu lennundus, kus täpne navigeerimine on hädavajalik. Signaali terviklikkuse probleem on keerulisemates keskkonnatingimustes veelgi keerulisem. Tihedates metsades, mägistel maastikel võivad GNSS-signaalid häirida, mis takistab täpset positsioneerimist. See piirang on eriti oluline välitegevuste ja rakenduste puhul, mis nõuavad keerukates maastikes usaldusväärseid asukohaandmeid. Teatud stsenaariumide korral on täpsuse halvenemine valdav piirang. [10]



Joonis 8. Mitmeteelise signaali efekt [10]

Teine tähelepanuväärne väljakutse on atmosfääritingimuste nüansirikas keerukus. Ionosfäär, Maa ülemise atmosfääri kiht, toob kaasa dünaamilisi häireid, mis mõjutavad GNSS-signaalide teekonda. Ionosfääri varieeruvus, mida mõjutavad sellised tegurid nagu päikese aktiivsus, võib põhjustada signaali viivitusi ja faaside edenemist, mis häirib GNSS-i positsioneerimise täpsust. Teadlased uurivad ionosfääri häirete keerukust, püüdes välja töötada mudeleid ja parandusalgoritme, mis leevendavad mõju GNSS-signaalidele. Maa pinnale lähemal asuv troposfäär tutvustab GNSS-signaale mõjutavate meteoroloogiliste elementide keerulist koosmõju (Joonis 9). Veeaur, temperatuurikõikumised ja atmosfäärirõhk võivad põhjustada viivitusi ja signaali paindumist, mis põhjustab positsioneerimise ebatäpsusi. Keeruliste troposfääriefektide mõistmine nõuab täiustatud modelleerimistehnikaid ja reaajas jälgimist, mis hõlbustab parandusmeetodite väljatöötamist GNSS-i täpsuse suurendamiseks. Eetri väljakutsed kutsuvad esile parandustehnikate arengu, mis on loodud atmosfääri häirete vastu võitlemiseks. Diferentsiaalne GNSS hõlmab näiteks statsionaarse võrdlusvastuvõtja signaalide võrdlemist mobiilse vastuvõtja signaalidega, võimaldades tuvastada ja parandada atmosfääri vigu. Mitmest orbiiditest koosnevate GNSS-süsteemide ja täiendusteenuste integreerimine aitab veelgi kaasa atmosfäärihäirete mõju navigeerimise täpsusele minimeerimisele. Teadlased täiustavad pidevalt mudeleid, mis kajastavad troposfääri tingimuste dünaamilist olemust, suurendades GNSS-i andmete täpsust erine vates keskkonnastenaariumides. [10]



Joonis 9. GNSS signaali levik [10]

Küberturvalisuse kontekstis puutub GNSS kokku signaalide võltsimise ja signaalide manipuleerimisega seotud haavatavustega. Pahatahtlikud osalejad võivad manipuleerida GNSS-signaalidega, mille tulemuseks on vale asukohateave. See kujutab endast riske kriitilistes rakendustes, kus täpne navigeerimine on ohutuse ja turvalisuse tagamiseks hädavajalik. Pettus, valede GNSS-signaalide genereerimise tehnika, ilmneb strateegilise ohuna, kui seda kasutavad riigi toetatud osalejad. Viimastel aastatel on eriti murettekitavad riskid, mis on seotud selliste riikide nagu Venemaa ja Hiina arenenud tehnoloogiat kasutavate GNSS-süsteemide rünnakutega. Need riigid on näidanud üles suutlikkust arendada keerukaid võltsimis- ja segamistehnoloogiaid, mis võivad häirida GNSS-signaale, mis võib põhjustada olulisi häireid ja tagajärgi. GNSS-süsteemide võltsimise ja segamisrünnakutega seotud riskid on mitmekordsed. Pettuste korral võivad ründajad edastada võltsitud GNSS-signaale vastuvõtjatele. See võib põhjustada vale asukoha määramise ja navigatsiooniteabe, mis võib põhjustada õnnetusi, volitamata juurdepääsu või kriitiliste süsteemide manipuleerimist. Seevastu segamisrünnakute eesmärk on ületada GNSS-signaale, edastades võimsaid raadiosagedussignaale samadel sagedusaladel, mida kasutavad GNSS-satelliidid. See võib viia signaali kadumiseni, takistades GNSS-vastuvõtjatel saada täpseid asukohaandmeid. Kriitiliste rakenduste puhul, nagu lennundus, merenavigatsioon või hädaabiteenused, võivad ummistumisest tingitud GNSS-signaalide kadumisel olla tõsised tagajärjed. Pettuste ja segamisrünnakutega seotud riskide maandamiseks võib kasutada erinevaid strateegiaid. Üks lähenemisviis on välja töötada

võltsimisvastased tehnikad, mis suudavad tuvastada ja tagasi lükata võltsitud signaale. Need tehnikad võivad hõlmata krüptoalgoritmide, vastuvõtja autentimise või täiustatud signaalitöötlusalgoritmide kasutamist, et eristada ehtsaid GNSS-signaale võltsitud signaalidest. Lisaks võib tugevate segamistuvastussüsteemide ja varunavigatsioonitehnoloogiate rakendamine suurendada GNSS-süsteemide vastupidavust tahtlike katkestuste vastu. Lisaks võivad rahvusvahelised koostööd ja regulatiivsed algatused mängida kesket rolli GNSS-signaalide tahtlikust katkestamisest tulenevate riskide käsitlemisel. Koostöö riikide, organisatsioonide ja tööstuse sidusrühmade vahel võib hõlbustada teadmiste, parimate tavade ja teabe jagamist, et töötada välja standardsed protokollid ja vastumeetmed. Sellised ühised jõupingutused on hädavajalikud ülemaailmse kaitse saavutamiseks tahtlike piiriüleste häirete vastu. [11]

Kuigi GNSS-tehnoloogia on muutnud navigeerimist ja positsioneerimist, on väljakutsetega tegelemine ja piirangute mõistmine selle tõhusaks kasutamiseks ülimalt oluline. Nende piirangute ületamiseks ning GNSSi töökindluse suurendamiseks erinevates töökeskkondades on pidevad teadusuuringud ja tehnoloogilised edusammud hädavajalikud.

3 KOOLITUS JA TEADLIKKUSE TÕSTMINE GNSS-TEHNOLOOGIA ALAL

Globaalsete satelliitnavigatsioonisüsteemide edukaks rakendamiseks ja optimaalseks kasutamiseks ei saa ülehinnata igakülgse koolituse ja teadlikkuse olulisust. GNSS-tehnoloogia nüansside käsitlemine ja teadlikkuse kultuuri edendamine on selle transformatiivse tehnoloogia täieliku potentsiaali ärakasutamise olulised komponendid. Tõhusatel koolitusprogrammidel on keskne roll, et anda inimestele võimalus GNSS-tehnoloogiast aru saada ja seda kasutada. Need programmid peaksid teenindama erinevaid sihtrühmi, alates konkreetsete tööstusharude professionaalidest, nagu geodeetid, kuni igapäevakasutajateni, kes kasutavad GNSS-i toega seadmeid. Koolituse põhikomponendid hõlmavad põhjaliku tehnilise arusaamise andmist GNSS-i põhimõtetest, sealhulgas signaali vastuvõtmisest, satelliitide orbiitidest ja veaallikatest. Lisaks peaksid koolitusprogrammid hõlmama GNSS-toega seadmete tööd, rõhutades funktsioone, seadeid ja tõrkeotsingut. Kasutajad peaksid oskama seadmete väljundeid tõlgendada ja mõistma GNSSi piiranguid erinevates keskkondades. Koolituse kohandamine konkreetsetele tööstusharudele tagab, et spetsialistid mõistavad oma tööga seotud nüansse. Näiteks võib ehitusspetsialistide koolitus keskenduda sellistele rakendustele nagu masina juhtimine ja täpne positsioneerimine kaevamise ajal, samas kui põllumajandusspetsialistid võivad saada koolitust GNSSi abil põllumajandustavade optimeerimiseks. Lisaks tööstusespetsiifilistele rakendustele peaks laiem koolitus rõhutama GNSSi ühiskondlikku mõju ja selle rolli igapäevaelus. See hõlmab navigeerimist, asukohapõhiseid teenuseid ja hädaolukordadele reageerimist. Kasutajad peaksid olema teadlikud sellest, kuidas GNSS suurendab ohutust, tõhusust ja mugavust nende elu erinevates aspektides. GNSS-tehnoloogia alase teadlikkuse edendamine hõlmab üldsuse harimist selle võimaluste, eeliste ja võimalike piirangute kohta. Seda on võimalik saavutada üldsuse teadlikkuse tõstmise kampaaniate, koolide haridusalgatuste ja laiemale kogukonnale kättesaadavate teabematerjalide kaudu. [1]

3.1 Professionaalsed koolitusprogrammid GNSS-tehnoloogia valdkonnas

GNSS-tehnoloogia edendamise üheks väljakutseks on erialaste koolitusprogrammide rakendamine. Sellised asutused nagu rahvusvaheline GNSS-teenistus (edaspidi IGS) pakuvad põhjalikke kursusi GNSSi põhialuste, andmeanalüüsi ja täpsete positsioneerimistehnikate kohta. Need programmid ei ole mõeldud mitte ainult inseneridele, kes on otseselt seotud süsteemi arendamisega, vaid ka professionaalidele erinevatest tööstusharudest, kes integreerivad GNSSi oma rakendustesse. Need programmid süvendavad põhiprintsiipe, täiustatud andmeanalüüsi tehnikaid ja täpsete

positsioneerimismeetodite praktilist rakendamist. Õppekavas navigeeritakse GNSSi nüanssides, hõlmates satelliitide konstellatsiooni dünaamikat, signaalitöötuse algoritme ja reaalmaailma rakendusi. Tõhusa GNSS-koolituse tunnuseks on koostöö valdkonna juhtidega. Külalisloengud, tööstusseminarid ja interaktiivsed seansid annavad väärtuslikku teavet praegustest suundumustest, väljakutsetest ja uutest tehnoloogiatest. Pärast edukat lõpetamist saavad tudengid sertifikaadid, mis on nende omandatud teadmiste kinnitus. Mainekate organisatsioonide, nagu IGS, sertifikaadid on olulise tähtsusega, pakkudes professionaalidele tunnustust ja kinnitust nende GNSS-tehnoloogia oskuste kohta. Tunnistades süsteemi pidevalt arenevat olemust, ulatuvad need programmid algkoolitusest kaugemale. Pidevad õppimisvõimalused, sealhulgas veebiseminarid, edasijõudnute kursused ja värskendused viimaste arengute kohta, tagavad, et spetsialistid jäävad kogu oma karjääri jooksul GNSSi edusammude esirinnas. Need professionaalsed koolitusprogrammid on loodud ülemaailmse juurdepääsetavuse tagamiseks. See kaasatus julgustab professionaale osalema erinevates geograafilistes asukohtades, edendades ülemaailmset ekspertide kogukonda. Ideede ja kogemuste vahetus selles kogukonnas aitab kaasa rikkama õpikeskkonna loomisele. Neid programme eristab nende pühendumus praktilisele rakendamisele. Tudengid osalevad praktilistes kogemustes, suheldes GNSS-seadmete, tarkvaratööriistade ja reaalmaailma simulatsioonidega. GNSSi hariduse integreerimine akadeemilisse õppekavasse on ülioluline satelliitnavigatsiooniga hästi kursis olevate uue põlvkonna spetsialistide kasvatamiseks. GNSSi interdistsiplinaarset olemust tunnistades on ülikoolid üle maailma võtnud kasutusele geodeesia, satelliiditehnoloogia ja positsioneerimissüsteemide kursused. Nende haridusalgatuste eesmärk on ületada lõhe teoreetiliste teadmiste ja praktilise rakendamise vahel. [12]

3.2 GNSS-tehnoloogia veebipõhised õppeplatvormid

Digihariduse ajastul pakuvad veebiplatvormid juurdepääsetavaid GNSS-i koolitusressursse. Üks tähelepanuväärne platvorm selles valdkonnas on Trimble CenterPoint RTX Training. Trimble, GNSS-tehnoloogia võtmemängija, pakub oma veebiplatvormi kaudu hulgaliselt interaktiivseid kursusi, veebiseminare ja dokumentatsiooni. Kursused hõlmavad GNSS-iga seotud teemade spektrit, sealhulgas satelliitnavigatsiooni põhialuseid, andmeanalüüsi tehnikaid ja praktilisi rakendusi. Platvorm hõlbustab pidevat õppimist, võimaldades professionaalidel ja entusiastidel olla kursis viimaste GNSS-tehnoloogia arengutega. Veebipõhised õppeplatvormid ületavad geograafilisi piire, pakkudes osalejatele paindlikkust GNSS-i kursustega omas tempos osalemiseks. Nende platvormide interaktiivne olemus tagab, et osalejad saavad aktiivselt aruteludes osaleda, küsimusi esitada ja kaaslastega koostööd teha. Need platvormid pakuvad sageli mitmesuguseid õpperessursse, sealhulgas

videoloenguid, interaktiivseid mooduleid ja reaalse maailma juhtumiuuringuid. Multimeedia lähenemisviis suurendab õppimiskogemust, pakkudes erinevaid õpistiile. Arvestades GNSS-tehnoloogia kiiret arengut, seavad veebiplatvormid prioriteediks pidevad värskendused, et sisu oleks asjakohane. Osalejad saavad kasu uusimast teabest, tagades, et nende teadmised kajastavad valdkonna hetkeseisu. Veebiplatvormide kohandatavus võimaldab integreerida uusi tehnoloogiaid, metoodikaid ja tööstuse parimaid tavasid, kui need ilmnevad. [13]

4 GNSS-TEHNOLOOGIA TULEVIKUSUUNDUMUSED JA UUENDUSED

GNSS-tehnoloogia on viimastel aastatel olnud kiire arengu tunnistajaks ning tulevik sisaldab paljutöotavaid suundumusi, mis võivad navigatsiooni- ja positsioneerimisvõimalusi muuta. GNSS valmis esile kutsuma transformatiivseid muutusi erinevates valdkondades, pakkudes uuenduslikke lahendusi ning aidates kaasa ühendatud ja tõhusama maailma arengule.

4.1 Autonoomsed sõidukid ja transport

Autonoomsete sõidukite tulekul on palju lubadusi transpordimaastiku muutmisel. GNSS-tehnoloogial on keskne roll autonoomsete sõidukite ohutuks ja tõhusaks tööks vajaliku täpse positsioneerimise ja navigeerimise võimaldamisel. Kuna autonoomsed sõidukid püüdleval ohutu ja tõhusa töötamise poole, kerkib GNSS-tehnoloogia esile kui tugipunkt, pakkudes täpset positsioneerimis- ja navigeerimisvõimalust, mis on nende edu jaoks ülimalt olulised. Autonoomsed sõidukid sõltuvad suurel määral täpsest ja usaldusväärsest asukohateabest, et navigeerida erinevates ja keerukates teedevõrkudes. GNSS-tehnoloogia pakub täpset lokaliseerimisvõimalust, võimaldades autonoomsetel sõidukitel oma täpset asukohta digitaalkaardil kindlaks teha. See põhiteave annab sõidukitele võimaluse planeerida optimaalseid marsruute, teha teadlikke otsuseid ja manööverdada läbi keeruliste teedevõrkude. GNSS-tehnoloogia pakub reaajas värskendusi sõiduki asukoha ja kiiruse kohta, võimaldades autonoomsetel sõidukitel dünaamiliselt reageerida muutuvatele teeoludele ja liiklusharjumustele. Täpse asukohateabega varustatud sõidukid saavad liiklusummikute, õnnetuste või teetõkete vältimiseks iseseisvalt kohanduda ja marsruuti muuta. See kohanduv navigeerimine ei taga mitte ainult tõhusust, vaid vähendab ka sõiduaega, et parandada kasutajakogemust. [10]

GNSS-tehnoloogia võib olla autonoomsete sõidukite terviklikkuse jälgimise lisaandur. Koos kaamerate, LIDAR-i ja radariga võimaldab GNSS sõidukitel oma asukohateavet ristkontrollida. GNSS-i terviklikkuse jälgimise tehnikad võivad tuvastada signaali võimalikke vigu või kõrvalekaldeid, pakkudes sõidukisüsteemidele hoiatusmehhanismi. Autonoomsed sõidukid seisavad sageli silmitsi väljakutsetega keskkondades, kus GNSS-signaalide kättesaadavus on piiratud, nagu linnakanjonid, tunnelid ja tihe mets. Tulevased GNSS-tehnoloogiad on valmis neid väljakutseid lahendama täiustatud algoritmide ning mitme sageduse ja orbiidi integreerimise kaudu. Nende uuenduste eesmärk on tagada pidev ja täpne positsioneerimine isegi stsenaariumide korral, kus signaali vastuvõtt on häiritud. GNSS-tehnoloogia aitab autonoomsete sõidukirakenduste puhul kaasa liiklejate ohutusele. Jalakäijaid, jalgrattureid ja teisi täpselt tuvastades ja asukoha määrates saavad

autonoomsed sõidukid teha teadlikke otsuseid kiiruse, trajektoori ja kokkupõrke vältimise kohta. See tehnoloogia hõlbustab ka kokkupõrke hoiatus- ja vältimissüsteemide rakendamist, suurendades veelgi liiklusohutust. GNSS-tehnoloogial on autonoomsete sõidukiparkide tõhusas toimimises ülioluline roll. Autopargi haldussüsteemid kasutavad GNSS-i, et jälgida sõidukite asukohta reaalajas, jälgida jõudlust, optimeerida marsruutimist ja eraldada efektiivselt ressursse. See parandab sõidukipargi üldist tõhusust, vähendab tegevuskulusid ja parandab kliendikogemust. GNSS-tehnoloogia aitab kaasa autonoomsete sõidukite jaoks ülioluliste kõrge eraldusvõimega kaartide loomisele ja värskendamisele. GNSS-i andmed koos teiste andurite teabega moodustavad täpsete ja ajakohaste kaartide aluse. Nende kaartidega integreeritud liitreaalsuse tehnoloogia parandab ümbritseva keskkonna tajumist ja mõistmist, suurendades autonoomsete sõidukite võimalusi. [1]

4.2 Targad linnad ja infrastruktuur

GNSS-tehnoloogia integreerimine nutikasse linnakeskkonda (Joonis 10) toob kaasa hulgaliselt eeliseid, muutes linnasüsteemide haldamise ja funktsionaalsuse revolutsiooniliseks. Alates varade täpsest jälgimisest kuni transpordi optimeerimise ja avaliku turvalisuse tagamiseni – GNSS mängib tarkade linnade kujundamisel kesket rolli. [1]



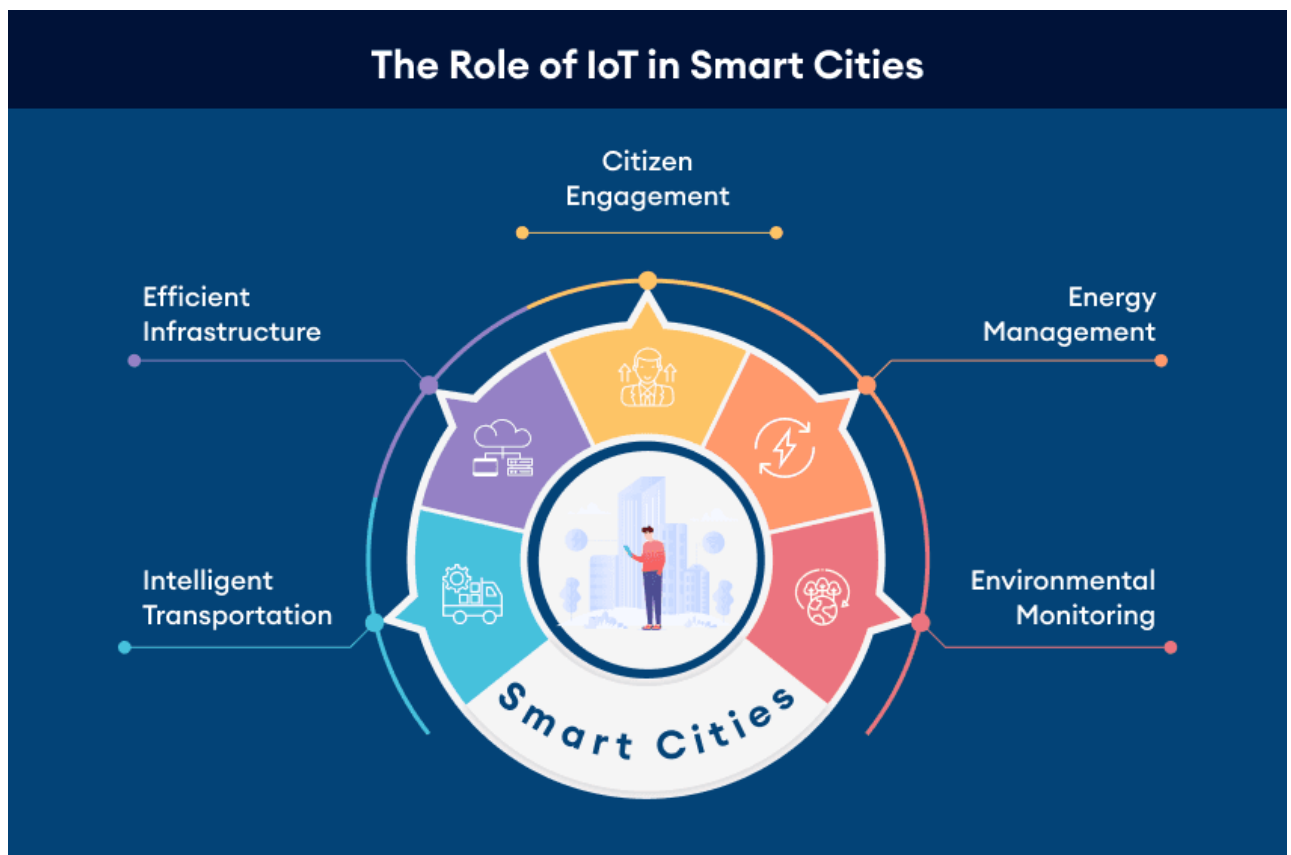
Joonis 10. Targa linna kontseptsioon [1]

GNSS-tehnoloogia hõlbustab erinevate targa linna toimimise jaoks oluliste varade täpset ja reaajas jälgimist. Ühissõidukeid, kiirabiautosid, jäätmekäitlusveokeid ja muud linna infrastruktuuri saab sujuvalt jälgida. See võimalus tagab parema varahalduse, parema ressursside kasutamise ja kõrgendatud töötõhususe, tagades linnateenuste optimeerimise dünaamiliste vajaduste rahuldamiseks. Intelligentsete transpordisüsteemidega (edaspidi ITS) integreeritud GNSS on targate linnade transpordisüsteemide haldamise ja optimeerimise edusamm. See võimaldab reaajas jälgida liiklusolusid, koguda andmeid liikluse analüüsiks ning pakkuda õigeaegset infot nii autojuhtidele kui transpordiasutustele. GNSS-põhised süsteemid aitavad optimeerida liiklussignaalide ajastust, tõhustada liiklusvoogu ja leevendada ummikuid. Avaliku ohutuse ja hädaolukordadele reageerimise valdkonnas on GNSS-tehnoloogia hindamatu väärtus. GNSS-i pakutav reaajas asukohateave võimaldab kiiresti reageerida vahejuhtumitele, aitab leida abivajajaid ja hõlbustab koordineeritud päästetööd. Geopiirded ja virtuaalsed perimeetrid suurendavad turvameetmeid, vältides volitamata juurdepääsu kriitilisele infrastruktuurile ja tagades kodanike turvalisuse. GNSS-andurid, mis on kinnitatud infrastruktuuri põhivaradele, sealhulgas sildadele, teedele ja hoonetele, võimaldavad igakülgset seiret. See hõlmab liikumiste jälgimist, deformatsioonide tuvastamist ja struktuuri tervise hindamist. Kogutud andmed võimaldavad teha ennetavat hooldust, vähendades infrastruktuuri rikete riski ja panustades targa linna taristu üldisesse vastupidavusse. GNSS-tehnoloogia on oluline nutikate linnade võrkude ja kommunaalteenuste haldamisel. Kommunaalteenuste infrastruktuuri, nagu elektriliinid, veetorustikud ja jäätmekäitlussüsteemid, jälgimine tagab tõhusa ressursside jaotuse, võimaldab ennetavat hooldust ja suurendab reageerimisvõimet hädaolukordade või teenusekatkestuste ajal. GNSS-tehnoloogia on mitmekülgse asukohapõhiste teenuste aluseks, rikastades elanike ja külastajate kogemusi nutikates linnades. Navigeerimis-, teeotsingu- ja geograafilise asukoha määramise teenused kasutavad GNSS-i andmeid, võimaldades inimestel hõlpsalt oma ümbruskonnas navigeerida, leida lähedalasuvaid mugavusi ning pääseda juurde asjakohasele teabele mobiilirakenduste ja nutiseadmete kaudu. GNSS-tehnoloogia kaasamine keskkonnaseire algatustesse aitab kaasa säästva arengu püüdlustele targates linnades. Integreerides GNSS-i teiste keskkonnaanduritega, saab koguda reaajas andmeid õhukvaliteedi ja ilmastikutingimuste kohta. See teave toetab linnaplaneerimise jõupingutusi, aitab parandada õhukvaliteeti ja soodustab säästvat linnaarengut. [14]

4.2.1 Nutistu ehk asjade interneti ühenduvus

Kiire linnastumise ja tehnoloogilise arengu ajastul on arukate linnade kontseptsioon esile kerkinud kui transformatiivne jõud, mis kujundab ümber linnamaastikke ja parandab elanike elukvaliteeti.

Selle linnaarengu keskmes on asjade Interneti (edaspidi IoT) ühenduvuse pöördeline roll (Joonis 11). [15]



Joonis 11. IoT roll nutikates linnades [15]

Hõlbustab andurite ja täiturmehhanismide sujuvat integreerimist linna infrastruktuuridesse, on IoT-ühenduvus toonud sisse uue intelligentse ja andmepõhise linnahalduse ajastu. Kuna aga nutikad linnad kasutavad IoT pakutavat potentsiaali, on oluline tegeleda sellega kaasnevate väljakutsetega, eriti andmeturbe ja privaatsuse valdkonnas. Tasakaalu leidmine innovatsiooni ja üksikisiku privaatsuse kaitsmise vahel muutub ülimalt tähtsaks, mis nõuab tugevat krüptimist, turvalisi sideprotokolle ja valvsaid autentimismehhanisme. IoT-ühenduvus võimaldab kasutada laia valikut andureid ja täiturmehhanisme kogu nutikas linnakeskkonnas. Need andurid võivad koguda andmeid erinevate parameetrite kohta, nagu õhukvaliteet, temperatuur, niiskus, müratase ja liiklusvoog. Teisest küljest saavad ajamid juhtida selliseid funktsioone nagu tänavavalgustus, niisutussüsteemid ja jäätmekäitlus. Nendelt nutikatelt anduritelt kogutud andmed ja täiturmehhanismide pakutav juhtimine aitavad kaasa tõhusale ressursside haldamisele ja linna toimimise optimeerimisele. IoT-ühenduvus võimaldab reaalajas andmeid koguda erinevatest seadmetest, anduritest ja taristusüsteemidest nutikas linnas. Need andmed edastatakse juhtmevabalt keskpлатvormile, kus neid analüüsitakse, et saada

väärtuslikke teadmisi ja toetada otsustusprotsesse. Reaalajas andmete kogumine võimaldab ennetavat jälgimist, tõhusat ressursside jaotamist ja kiiremat reageerimisega hädaolukordadele või muutuvatele tingimustele. IoT-ühenduvus võimaldab ühendada erinevaid taristussüsteeme, nagu transport, energeetika, veemajandus, jäätmekäitlus ja avalik turvalisus. See omavaheline seotus võimaldab sujuvat suhtlust, andmete jagamist ja koordineerimist erinevate komponentide vahel. Näiteks saab liiklusandmeid jagada ühistranspordisüsteemidega, et optimeerida marsruute ja sõiduplaane, või kasutada energiatarbimise andmeid kogu linna energiatõhususe parandamiseks. IoT-ühenduvus võimaldab kriitilise infrastruktuuri varade ja süsteemide kaugseiret ja juhtimist. Näiteks saab veevarustusvõrkude kaugseire abil tuvastada lekkeid või kõrvalekaldeid, mis võimaldab õigeaegselt remonti teha ja veevarusid säästa. Samamoodi saab tänavavalgustussüsteemide kaugjuhtimispuldi abil dünaamiliselt reguleerida valgustuse taset vastavalt liiklus- või keskkonnatingimustele, säästes energiat ja parandades linnaohutust. Nutikad parkimissüsteemid võivad suunata juhid vabadele parkimiskohtadele, vähendades ummikuid ja parandades parkimiskogemust. IoT-ühenduvus suurendab nutikate linnade üldist elukvaliteeti, võimaldades isikupärastatud ja tõhusaid teenuseid. IoT-ühenduvus nutikates linnades tekitab muret andmete turvalisuse ja privaatsuse pärast. [15]

4.3 Kvant-GNSS täiustatud turvalisuse jaoks

Kvant-GNSS võib pakkuda täiustatud turvalisust kvantvõtmejaotuse (edaspidi QKD) protokollide rakendamise kaudu. QKD kasutab võimalike pealtkuulamiskatsete tuvastamiseks kvantomadusi, tagades, et krüpteerimisvõtmed jäävad pealtkuulamise või rikkumiste suhtes läbitungimatuks. See kvantipõhine lähenemine loob turvaliseks sideks ja andmevahetuseks tugeva krüptimise, vähendades traditsiooniliste võtmejaotusmeetoditega seotud riske. GNSS-i signaalid on haavatavad võltsimis- ja segamisrännakute suhtes, kus pahatahtlikud osalejad võivad signaalidega manipuleerida või neid segada, mis toob kaasa ebatäpse asukoha ja ajastuse teabe. Kvant-GNSS võib pakkuda täiustatud võltsimis- ja segamisvastaseid võimalusi, võimendades kvantfüüsika põhimõtteid. Näiteks võivad kvantipõhised tuvastusmeetodid tuvastada ja eristada autentseid signaale võltsitud või ummistunud signaalidest, võimaldades usaldusväärset ja turvalist navigeerimist ja ajastust. Kvant-GNSS võib pakkuda turvalisi ja võltsimisnähtavaid ajatempleid erinevate rakenduste jaoks. Takerdumise kvantomadusi kasutades saab luua kvantturvalisi ajatempleid, mis tagavad ajapõhiste andmete terviklikkuse ja autentsuse. Neid ajatempleid saab kasutada finantstehingute, võrgu sünkroonimise, andmete logimise ja muude rakenduste jaoks, kus täpne ja turvaline ajatempli määramine on ülioluline. [16]

Kvant-GNSS võib kaasa aidata ka turvalisuse suurendamisele, pakkudes kvantjuhusliku arvu genereerimise (edaspidi QRNG) kaudu tõelise juhuslikkuse allikat. Traditsioonilised juhuslike arvude genereerimise algoritmid on deterministlikud ja sõltuvad prognoositavusest. Kvantprotsessidel põhinev QRNG genereerib tõelisi juhuslikke numbreid, mis on oma olemuselt ettearvamatud ja mida saab kasutada krüptograafiliste rakenduste, turvaliste sideprotokollide ja muude turvatundlike toimingute jaoks. Kvant-GNSS võib mängida rolli kvantkindlate krüptoalgoritmide väljatöötamisel ja juurutamisel. Kuna kvantarvutid muutuvad võimsamaks, võivad traditsioonilised krüptoalgoritmid, mis tuginevad arvutuslikule keerukusele, muutuda haavatavaks. Kvant-GNSS võib aidata uurida ja rakendada kvantresistentseid krüptoalgoritme, mis suudavad vastu pidada kvantarvutite rünnakutele, tagades GNSS-süsteemide ja -rakenduste pikaajalise turvalisuse. [17]

5 METOODIKA

Autori eesmärk on põhjalikult hinnata integreeritud globaalsete satelliitnavigatsioonisüsteemide (GNSS) tõhusust raudtee-ehitusprojektides. Uurimistöö põhineb juhtumiuuringutel, keskendudes kolmele suuremahulisele raudtee-projektidele, milleks on "Aegviidu – Tapa jaamavahe I peatee raudtee rekonstrueerimine", "Ülemiste jaama raudteeinfrastruktuuri rekonstrueerimine" ja "Aegviidu – Tapa – Tartu raudteelõigu elektrifitseerimine" projektid. Metoodika hõlmas traditsiooniliste meetodite kasutamise tulemuste võrdlemist RTK-tehnoloogia abil saadud tulemustega. Andmete kogumise protsess hõlmas erinevaid tehnikaid, sealhulgas geodeetilise teabe analüüsi, kaablite paigutuste uurimist, AutoCADi kasutamist üksikasjalikuks analüüsiks ja tihedat koostööd mõõdistusmeeskondadega, et koguda väärtuslikke teadmisi. Integreeritud GNSS-süsteemide tõhususe kohta tervikliku arusaamise kogumiseks viidi iga projekti jaoks läbi ulatuslikud andmekogumistoimingud.

5.1 Aegviidu - Tapa jaamavahe I peatee rekonstrueerimise projekt

Tapa-Aegviidu jaamavahe I peatee rekonstrueerimisel kasutati eranditult traditsioonilisi meetodeid. Traditsioonilised meetodid hõlmasid endasse baloonvärviga raudtee-valdaja kaablitrassi märgistamist pädevate spetsalistide poolt vastavalt nende teadlikusele ning kaabli paigutusplaanidele (edaspidi geoalus). Kahjuks tõi see kaasa olulisi probleeme, sealhulgas optiliste maa-aluste ja dispetsersidekaablite kahjustamise puurimis – ja kaevetööde teostamisel (Foto 1).



Foto 1. Puurimistööde teostamine Aegviidu - Tapa jaamavahe I peatee kõrval ilma ntegreeritud GNSS-süsteemide või RTK-tehnoloogia kasutamiseta

Kaablite purunemine põhjustas paljude reisirongide ja kaubarongide hilinemise ja liikluskatkestuse sihtjaamani. Need viivitused ja ohutusnõuete rikkumised tõid tööteostajale kaasa olulised rahatrahvid ning töö tellijale lisakulutused tööjõu väljakutsumisele raudteejaamadesse rongi liikluse reguleerimiseks. Probleemi lahendamiseks ja kindlakstegemiseks, milline maa-alune kaabel oli katki, kulus üle 8 tundi. Integreeritud GNSS-süsteemide või RTK-tehnoloogia puudumine oli otsustava tähtsusega tegur, kuna töötajatel oli raskusi maapinnal olevate kaablivarude visualiseerimisel, mis põhjustas juhuslikke kahjustusi. Väljakutsete kriitiline aspekt oli nähtavuse piiratus kohapeal, mida süvendas integreeritud GNSS- või RTK-süsteemide puudumine. Töötajate suutmatus kaablite piire õigel ajal märgata aitas märkimisväärselt kaasa juhtunud intsidentidele.

5.2 Aegviidu - Tapa - Tartu teelõigu elektrifitseerimisprojekt

Aegviidu - Tapa - Tartu elektrifitseerimisprojekti kasutati RTK-tehnoloogiat. Projekti ajal keskenduti ohutute puurimistöde tagamisele kindlaksmääratud koordinaatidel. Põhiülesanne hõlmas geodeetiliste andmete analüüsimist ja AutoCADi kasutamist puurimisplaanide ja olemasolevate maa-aluste kaablite paigutuse võrdlemiseks (Joonis 12). Enne tööde teostamist oli autoriga väljatöötatud tegutsemisplaan, mis hõlmas endasse järgmised kohustuslikud tegevused [18]:

1. Geodeetiline andmete analüüs:

- Olid edastatud geodeetiliselt meeskonnalt puurimiskohtade koordinaadid;
- Kasutatud geodeetilisi andmeid, et mõista piirkonna topograafiat, kõrgusi ja ruumilist jaotust.

2. Kaabli paigutuse uurimine:

- Saadud tööde tellijalt kaablite geoalus Autocadi dwg faili formaadis.

3. AutoCADi dwg faili analüüs:

- Kasutatud AutoCADi puurimiskoordinaatide joonistamiseks kaabli paigutusele;
- Punktide täpseks paigutamiseks kasutati täpseid mõõtmisi ja koordinaate.

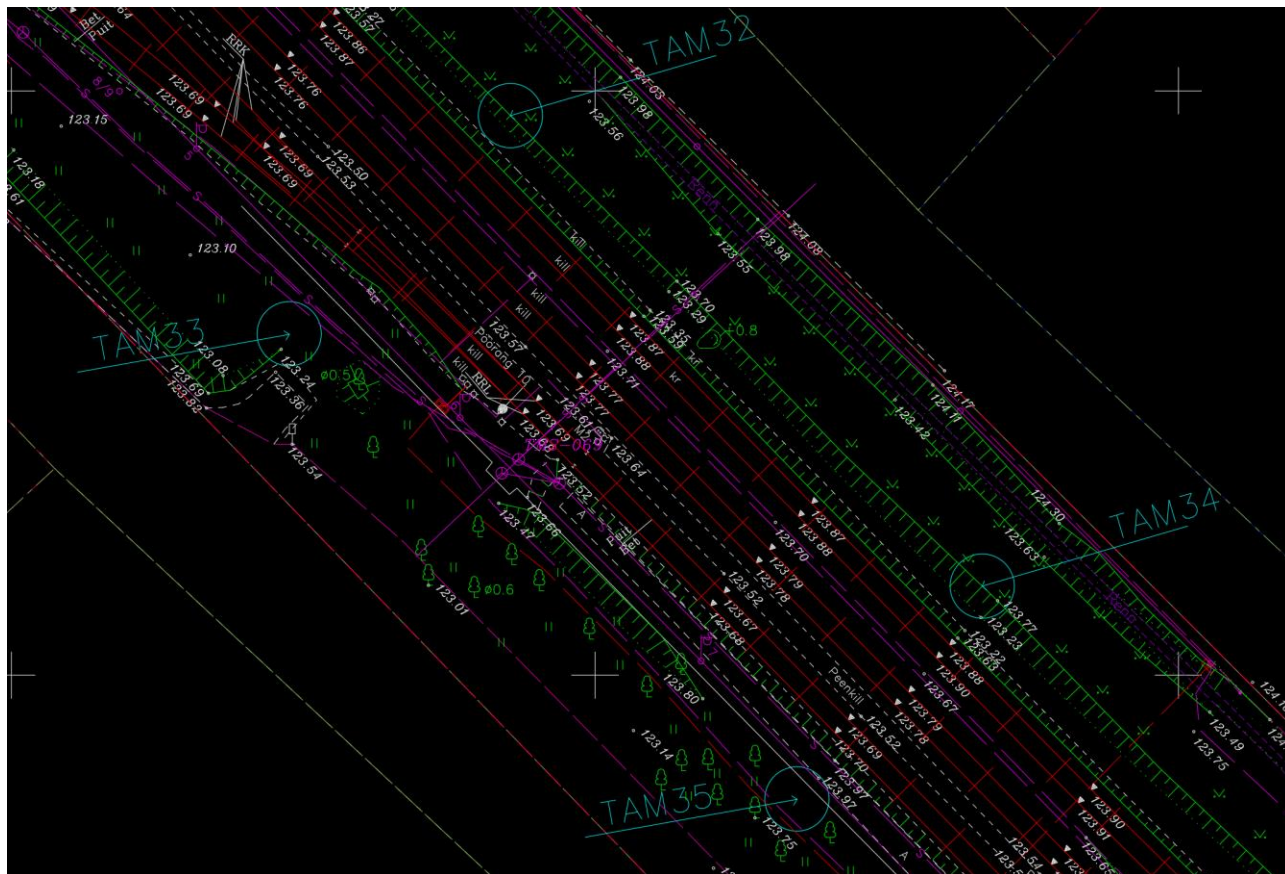
4. Ristmiku tuvastamine:

- Teostatud süstemaatilise puurimispunktide ja kaabli paigutuse võrdluse AutoCADis;
- Tuvastatud võimalikud ristmikud või puurimispunktide lähedus kaablitega.

5. Parandused ja leevendused:

- Tehti koostööd geodeetilise meeskonnaga, et kohandada puurimiskoordinaate, kui tuvastati ristmikud;
- Kasutatud AutoCADi tööriistu puurimispunktide muutmiseks, tagades, et need oleksid kaablitest vabad. [18]

- Puurimispunktide koordinaatide andmete õigsuse testimine;
- RTK liikuvjaama töötamise testimine ning tööde teostamise objektile seadme transportimine.



Puurimispunktide ja kaablite paigutuse süstemaatiline võrdlemine AutoCADis hõlbustas võimalike ristmike või läheduse tuvastamist, pakkudes teadmisi järgnevateks toiminguteks. Koostöö mõõdistusmeeskonnaga võimaldas puurimiskoordinaate reaajas kohandada, tagades, et need olid kaabliteta. Nimetatud projekti käigus olid kasutusel traditsioonilised meetodid, seotud baloonvärviga kaablitrassi märgistamisega (Foto 2).



Foto 2. Kaabitrassi märgistamine raudtee valdaja poolt baloonvärviga

Suurel määral tööde teostamisel tugineti RTK liikuvjaama ülelaetud töödeldud failile. AutoCADi tööriistad mängisid puurimispunktide muutmisel kesket rolli, mille tulemuseks oli projekti edukas lõpuleviimine ilma kaablikahjustuste või häireteta.

5.3 Ülemiste jaama infrastruktuuri rekonstrueerimine

Ülemiste projekti käigus kaablite märgistamise traditsiooniliste metoodikatega seotud väljakutsete põhjalik uurimine tõi esile mitmeid kriitilisi probleeme. Need väljakutsed, mis tulenevad tavapäraste lähenemisviiside piirangutest, rõhutasid vajadust täiustatud tehnoloogiate järele ehitustegevuse kontekstis, eriti nende puhul, mis hõlmavad puurimis – ja kaevetöid. Kohapeal traditsiooniliste meetoditega märgistatud kaablite ja geoalusel esitatud kaablite vahel ilmnesisid lahknevused. Nimelt raudtee-valdaja poolt esitatud geoalusel ei olnud ebaaktiivsed kaablid näidatud, mis tõi kaasa endaga,

et kaevetöödel ilmnes maa alt kaabel, kuid RTK liikuvjaama üles laetud geoalusel kaablid puudusid. Tavaliselt ebaaktiivsed kaablid geoalusele ei märgita, seega töövõtjale tekkis märkimisväärselt tööd juurde, millega ei ole ta esialgu arvestanud. Selle tulemusel ei osanud tööde teostaja töömahtu adekvaatselt arvestada ning tekkisid Tellijaga arusaamatusi seoses lisatöödega ning tööde teostamise mahu akteerimisega. Lisaks eelmainitule projekti geodeetiline alusplaan ei klapinud reaalse olukorraga töömaal. Maapõues palju tundmatuid kaableid ja muid konstruktsioone (Foto 3).



Foto 3. Tundmatu kaabli tuvastamine Ülemiste raudteejaamas kaevetööde teostamisel

Alajaamade vahelisel lõigul on geoalusel kajastatud toimivad keskpinge elektrikaablid, mis aga reaalselt asuvad oluliselt kaugemal. Lisaks on töömaal väljakaevates väga palju olemasolevaid mahajäetud kaableid, mille olemasolust ei tea raudtee valdajad midagi. Nende tuvastamine võtab aega, mille tõttu tekib kaevetöödel ootamatuid seisakuid ning tööde teostamine on madala tootlikkusega. On vajalik raudtee valdaja poolne täpsem kaablite mahamärkimine sh vanade, olemasolevate plaanide detailsem läbitöötamine. Tööde teostaja omalt poolt on sunnitud teostada täiendav kaablite otsimine ja tähistamine töömaal siinkohal kasutada kaablitel generaatorit, et

tuvastada kaablite täpsem asukoht ja sügavus. Lisada kaevetööde frondile täiendavat käsitööjõudu kaablite välja otsimisel (Foto 4).

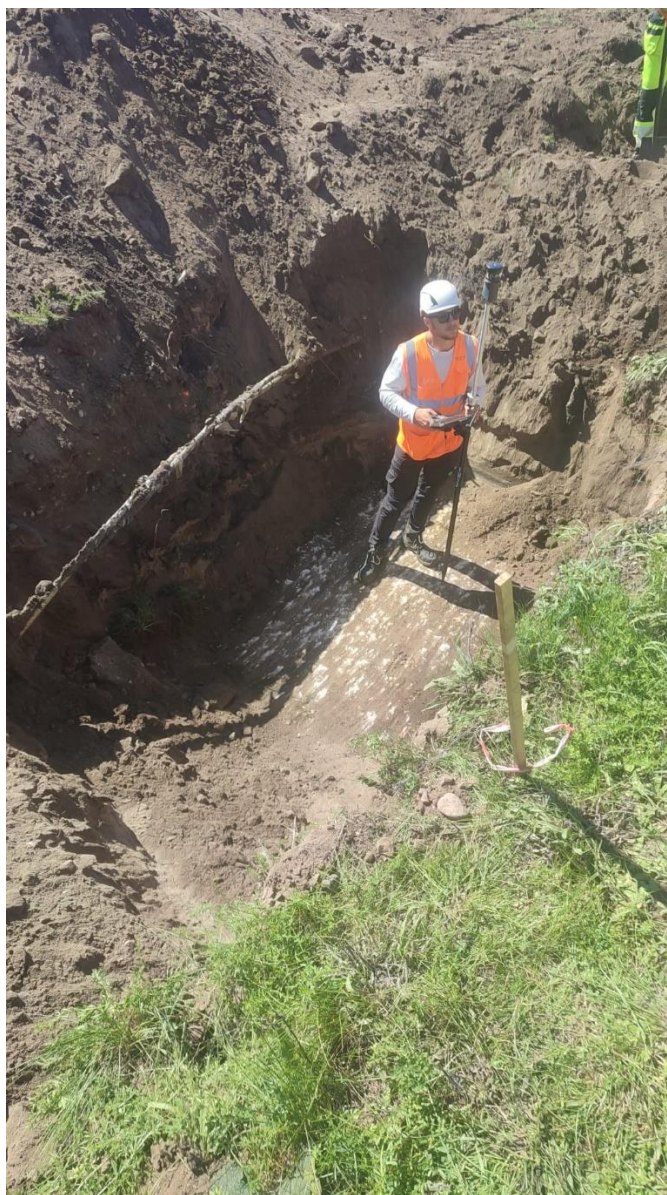


Foto 4. Kaevetöödel tuvastatud tundmatu kaabli asukoha RTK liikuvjaama andmetega võrdlemine

Märkimisväärne tööjõud ja masinate pidev liikumine tähistatud kaabliteel tingisid sidemehaanikute sagedase kaablimärgistamise kogu päeva jooksul. See pidev märgistamise pingutus kahandas muid olulisi ülesandeid ja tõi esile üksnes traditsioonilistele meetoditele tuginemise ebaefektiivsuse. Lisaks esinesid üksikud tähelepanekud, kui raudtee – valdaja pädevad töötajad on jäänud märgistamata kaablitrassi, kuid geolusel kaablitrass vastaval kohal oli olemas. See ebakõla rõhutas tavapäraste kaablite märgistamise tehnikate ebausaldusväärsust.

Ülemiste projekt valgustas väljakutsete spektrit, põimides kokku traditsioonilised kaablimärgistusmeetodid ja täiustatud georuumiliste tehnoloogiate infusiooni. See ühendamine rõhutas tavapäraste lähenemisviiside piiranguid ja tõstis esile vananenud infrastruktuurist läbi imbunud keskkonnas töötamise keerulist dünaamikat.

Üks silmapaistvamaid väljakutseid, millega projekti käigus kokku puututi, oli seotud maa-aluste ehitus- ja telekommunikatsiooni asukohaandmete ebatäpse edastamisega töövõtjale läbi tööprojektide põhiplaanide. Projekti ajakava kohaselt kavandati kriitilised piiksutööd, kasutades masinate täpsuse saavutamiseks RTK liikuvjaam. RTK liikuvjaam töötas ülelaadimisega taristu omaniku antud üldplaani alusel, kus oli märgitud maa-aluse veetorustiku asukoht. Ülevaatustööde käigus juhtus aga üllatav paljastus – veetorustik oli omaniku poolt töövõtjale edastatud põhiplaanil valesti paigutatud. See lahknevus põhiplaani ja veetorustiku tegeliku asukoha vahel tõi kaasa rasked tagajärjed. Projekti teostamise käigus rikkus töövõtja antud infole tuginedes tahtmatult omaniku veetoru. Selle kahju mõju oli märkimisväärne, põhjustades raudtee ülejutuse. Täheldatud erinevus põhiplaani ja tegeliku olukorra vahel oli murettekitav 44,8 meetrit (Foto 5).



Foto 5. Kahjustatud veetorustiku asukoht võõreldes RTK liikuvjaama ülelaetud veetorustiku asukoha andmed

See juhtum ei rõhutanud mitte ainult täpse andmeedastuse kriitilist tähtsust, vaid rõhutas ka projektiplaanide ja kohapealse tegelikkuse vaheliste lahknevuste võimalikke tagajärgi. Veetorustiku kahjustus mitte ainult ei seganud projekti edenemist, vaid nõudis ka täiendavaid ressursse ja jõupingutusi olukorra parandamiseks, rõhutades vajadust andmeedastusprotsessides tugevate kvaliteedikontrolli meetmete järele. See juhtum on väärtuslik õppetund keerukate ehitusprojektide põhjaliku planeerimise, täpse dokumentatsiooni ja pideva kontrollimise olulisusest (Foto 6).



Foto 6. Raudtee üleujutus avarii tagajärjel

RTK liikuvjaam oli projektiga osaliselt integreeritud koos omanikult saadud teabega geoalusel maa-aluste kommunikatsioonide kohta. Ülemiste jaama infrastruktuuri rekonstrueerimisel rakendati traditsiooniliste meetodite ja RTK liikuvjaama osalise kasutamise kombinatsiooni. Väljakutsed tekkisid vananenud sideinfrastruktuuri tõttu, mis tõi kaasa segaduse kaevetööde ajal. Õnnetused juhtusid siis, kui tahtmatult said kahjustada kaablid, mida RTK liikuvjaamas polnud näha. See tõi esile piirangu, mis tulenevad ainult traditsioonilistest meetoditest või RTK-tehnoloogia mittetäielikust kasutamisest. Avariid juhtusid siis, kui RTK liikuvjaama ei kasutatud, mille tagajärjel said viga erinevad foorikaablid. Õnneks jäid töövõtja taastamiskulud suhteliselt madalaks, kuid need juhtumid rõhutasid võimalikke riske, mis on seotud arenenud georuumiliste tehnoloogiate puudumisega ehitustegevuse käigus. See Ülemiste projekti nüansirikas uurimine selgitas traditsiooniliste kaablimärgistusmeetodite mitmetahulisi väljakutseid ja RTK-tehnoloogia osalise

integreerimisega seotud piiranguid. Leiud rõhutavad täiustatud georuumiliste tehnoloogiate hädavajalikkust ehitusprotsesside täpsuse, töökindluse ja ohutuse suurendamiseks, eriti keskkondades, mida iseloomustab keeruline infrastruktuuri ajalugu.

6 TULEMUSED

Kolmest projektist kogutud andmeid analüüsiti põhjalikult, et hinnata integreeritud GNSS-süsteemide raudtee-ehituses kasutamise eeliseid ja väljakutseid. Analüüsi esmane eesmärk oli võrrelda traditsiooniliste kaablimärgistusmeetodite täpsust, tõhusust ja ohutust integreeritud GNSS-süsteemidega. Analüüsi aluseks oli projektide käigus esinenud intsidentide ja väljakutsete üksikasjalik uurimine, samuti integreeritud GNSS-süsteemide kasutamisega saavutatud tulemused. Lisaks uuriti ja analüüsiti uuringus raudtee-ehituses integreeritud GNSS-süsteemidega seotud piiranguid ja väljakutseid, nagu andmete täpsus, kaablidokumentatsiooni lahknevused ja pärandkommunikatsiooni infrastruktuuriga tegelemise keerukus. Tänapäeva Eesti raudtee kaablivõrgustik on suuresti ehitatud NSVL-i ajal ning toetub vanadele paberkandjatele, mis toob kaasa põhiteabe kõikuva täpsuse.

Aktiivne osalemine käimasolevates GNSS-süsteeme kasutavates raudtee-ehitusprojektides andis hindamatuid teadmisi. Positsioneerimisandmed, mõõtmistulemused ja projekti dokumentatsioon koguti ning neid analüüsiti põhjalikult, et hinnata nende mõju projekti kvaliteedile ja tõhususele. Nende täpsuse ja tõhususe hindamiseks viidi läbi põhjalik võrdlus integreeritud GNSS-süsteemide ja traditsiooniliste raudteeehitusmeetodite vahel.

Kolme oluliste raudteeprojekti põhjaliku analüüsi välitöödel keskenduti puurimis- ja kaevetööde vaatlusele ja teostamisele. Traditsiooniliste meetodite abil saadud tulemusi võrreldi RTK - tehnoloogiaga saadud tulemustega, pakkudes põhjalikku perspektiivi GNSS-tehnoloogia raudtee-ehitusse integreerimisega seotud eeliste ja väljakutsete kohta. Integreeritud GNSS-süsteemide või RTK-tehnoloogia puudumine Tapa-Aegviidu projektis tõi kaasa täpseid tööhäireid ja rahalisi karistusi. See juhtum rõhutas täiustatud positsioneerimistehnoloogiate kriitilist rolli häirete leevendamisel ja projekti tõhususe suurendamisel. Seevastu Aegviidu - Tapa - Tartu elektrifitseerimisprojekt näitas RTK efektiivsust puurimistöde käigus tekkivate kaablikahjustuste ärahoidmisel. See positiivne tulemus rõhutab GNSS-tehnoloogia potentsiaali suurendada ohutust ja täpsust konkreetsetes ehitusstsenaariumides. Traditsiooniliste meetodite ja osalise RTK-tehnoloogia kombinatsiooni kasutav Ülemiste projekt heitis valgust vananevast infrastruktuurist tulenevatele väljakutsetele. Õnnetused juhtusid pelgalt visuaalsele kaablimärgistusele tuginedes, rõhutades vajadust tervikliku geodeetiliste andmete lähenemise järele, et tagada otsuste tegemise ohutus ja täpsus.

Metoodika hõlmas mitmesuguste raudteeprojektide välitööde kogemuste põhjalikku ülevaadet, tuues esile traditsiooniliste meetodite kontrastsed tulemused võrreldes integreeritud GNSS-süsteemide ja RTK-tehnoloogiaga. Nendest juhtumiuuringutest saadud arusaamad loovad aluse nende metoodikate täpsuse, tõhususe ja ohutusega seotud mõjude võrdlevale analüüsile.

Selles lõputöös kasutatud metoodika andis väärtuslikku teavet integreeritud GNSS-süsteemide rakendamise kohta raudtee-ehituses ning tõestas, et traditsioonilised meetodid vajavad märkimisväärselt uenenenud tehnoloogiate järele. Põhjaliku andmete kogumise ja põhjaliku analüüsi abil käsitleti uuringus integreeritud GNSS-süsteemide kasutamisega seotud eeliseid ja väljakutseid igas projektis. Iga projekti jaoks vastuvõetud konkreetne metoodika andis üksikasjalikud ja nüansirikkad ülevaated, pakkudes igakülgselt arusaama ainulaadsetest väljakutsetest, millega erinevates projektistsenaariumides kokku puututakse. Selle lõputöö tulemused panevad aluse edasistele aruteludele, soovitudele ja võimalikele parendustele integreeritud GNSS-süsteemide rakendamisel raudtee-ehituses

7 JÄRELDUSED

Eesmärkide saavutamiseks kasutati terviklikku lähenemist, mis hõlmas kirjanduse ülevaadet, välitööd ja võrdlevat analüüsi. Viidi läbi põhjalik ülevaade olemasolevatest õppematerjalidest ja praktilistest juhistest, et saada terviklik arusaam integreeritud GNSS-süsteemidest erinevates valdkondades.

Läbiviidud analüüs valgustas integreeritud GNSS-tehnoloogiaga saavutatud paremat täpsust võrreldes traditsiooniliste meetoditega, pakkudes konkreetseid tõendeid selle suutlikkusest maandada riske ja suurendada geodeetiliste andmete täpsust raudteeprojektides. Tuvastati mitu väljakutset, mis hõlmavad tehnoloogilisi piiranguid, signaali häireid, õiguslikke ja regulatiivseid kaalutlusi ning koolitusprobleeme. Nende väljakutsetega tegelemine muutub areneva tehnoloogiaga ülioluliseks ning GNSS-süsteemide pidev arendamine pakub võimalusi praeguste piirangute ületamiseks.

Esimene väljakutse seisneb GNSS-tehnoloogiaga seotud tehnoloogilistes piirangutes. Vaatamata edusammudele eksisteerivad teatud tehnilised piirangud, mis nõuavad täpsuse ja kohanemisvõime suurendamiseks erinevates ehitusstsenaariumides täiendavat viimistlemist.

Teine takistus on GNSS-signaalide poolt kogetavad häired. Välised tegurid, nagu keskkonnatingimused või läheduses asuvad elektroonikaseadmed, võivad signaalide kvaliteeti kahjustada. Selliste häiretega tegelemine ja nende leevendamine on raudtee-ehituskeskkonnas katkematu ja usaldusväärse GNSSi töö tagamiseks üliolulised.

Lisaks kerkivad oluliseks raskuseks koolitusprobleemid. GNSS-tehnoloogia edukas rakendamine tugineb kvalifitseeritud ja spetsiifiliste oskustega tööjõule. Kriitilisteks koolituseesmärkideks on oskuste puudusest üle saada ja tagada, et töötajad oskaksid GNSS-seadmeid oskuslikult käsitseda ja andmeid tõlgendada. Tugevad koolitusprogrammid on vajalikud, et anda töötajatele GNSSi tõhusaks kasutamiseks vajalikud pädevused.

Kokkuvõttes rõhutavad need väljakutsed – tehnoloogilised piirangud, signaalihäired ja koolitusprobleemid – vajadust kohandatud strateegiate ja lahenduste järele. Nende takistuste ületamine on oluline, et täielikult realiseerida GNSS-tehnoloogia eeliseid raudtee-ehitusprojektide kontekstis. Välitööde vaatluste tulemused samuti rõhutavad vajadust traditsiooniliste meetodite välja vahetamisele kaasaegsemate tehnoloogiate järele.

KOKKUVÕTE

Kokkuvõtteks võib öelda, et see lõputöö alustas terviklikku uurimist, mis hõlmas kirjanduse ülevaadet, kohapealseid kogemusi ja võrdlevat analüüsi. Keskseks punktiks oli GNSS integreerimine raudtee-ehitusprojektidesse, pöörates erilist tähelepanu nende mõjule täpsusele, tõhususele ja ohutusele. Lõputöö alguses püstitatud eesmärgid ja tegevused olid autori poolt saavutatud.

Töö autor uuris ja võrdles:

1. Olemasoleva teadusliku kirjandust, uurimisartikleid ja praktiliste juhendeid.
2. Teostatud välitööde kulgnemise protsessi, mis hõlmas raudteetööde tegelikku teostamist GNSS-süsteemide abil või selle puudumisel.
3. Traditsioonilisi meetodeid võrreldes integreeritud GNSS-süsteemidega.
4. Väljakutseid ja piiranguid, mis võisid tekkida integreeritud GNSS-süsteemide kasutamisel raudtee-ehitustöödel.

Analüüs näitas kõlavalt integreeritud GNSS-tehnoloogiaga saavutatud ülimat täpsust, asetades selle suurepärase vahendina riskide maandamisel ja raudteeprojektide geodeetiliste andmete täpsuse tõstmisel. Püüdes integreerida globaalsed satelliitnavigatsioonisüsteemid sujuvalt raudtee-ehitusse, on tuvastatud mitu peamist väljakutset ning alljärgnevalt toob autor välja pakutud lahendusi GNSS-tehnoloogia tõhususe suurendamiseks selles kontekstis.

Signaali häiretega seotud probleemid:

1. Välised tegurid, nagu keskkonnatingimused ja elektroonilised seadmed, võivad halvendada GNSS-signaalide kvaliteeti, põhjustades potentsiaalseid katkestusi raudtee ehitustegevuses.
2. Seisab silmitsi piirangutega kohanemisel raudteeprojektide erinevate ehitusstsenaariumidega, sealhulgas tunnelid, linnakeskkond ja tiheda taimestikuga alad.

Ettepanekud signaali häiretega seotud probleemide lahendamiseks:

1. GNSS-tehnoloogia arendajate, raudteeinseneride ja ehitusekspertide vahelised koostöö jõupingutused võivad käivitada uurimistööd GNSS-i täpsuse ja kohanemisvõime täiustamiseks. Tehnoloogia kohandamine konkreetsete stsenaariumide jaoks tehnoloogiliste uuenduste abil on ülioluline.

2. Täiustatud signaalitöötlusalgoritmide ja keskkonnaseiresüsteemide rakendamine võib aidata signaali häireid leevendada. See hõlmab reaajas analüüsi ja kohandusi, et säilitada usaldusväärne GNSS-i töö.

Oskuste puudumisega ja tööjõu väljaõpega seotud probleem:

1. GNSS-tehnoloogia edukaks rakendamiseks on vaja kvalifitseeritud tööjõudu, kes oskab GNSS-seadmeid kasutada ja andmeid tõlgendada.

Ettepanek oskuste puudumiste ja tööjõu väljaõpega seotud probleemide lahendamiseks:

1. Töötada välja terviklikud koolitusprogrammid koostöös haridusasutuste ja tööstusliitudega. Need programmid peaksid hõlmama GNSS-seadmete kasutamist, andmete tõlgendamist ja tõrkeotsingut, tagades vilunud ja kohanemisvõimelise tööjõu.
2. Võimaldada töötajatel osaleda GNSS-tehnoloogia veebipõhistel õppeplatvormidel.
3. Kaasata töötajaid välitöödel, siis kui on kasutusel GNSS, et saada praktilist kogemust vastava süsteemi kasutamisel.

Selle lõputöö olulisus seisneb selle mitmetahulises mõjus globaalsete satelliitnavigatsioonisüsteemide (GNSS) integreerimisele raudtee-ehitusse, lahendades kriitilisi väljakutseid ja sillutades teed transformatiivsetele edusammudele. Lõputöö aitab tõsta raudtee-ehituse täpsust, tuvastades GNSS-tehnoloogia väljakutsed, mis on üliolulised täpsete geodeetiliste andmete tagamisel, mis viib lõpuks jõulisemate ja usaldusväärsemate ehitusprojektideni. Lahendades väljakutseid ja pakkudes välja lahendusi, on lõputöö juhendiks raudtee-ehituse tööefektiivsuse suurendamiseks, lihtsustades töövooge, vähendades häireid ja optimeerides projektide ajakava. See käsitleb väljakutseid, mis leevendamisel aitavad kaasa ohutuma töökeskkonna loomisele, mille tulemuseks on intsidentide, õnnetuste ja häirete vähenemine. Väljakutsete ja lahenduste põhjaliku uurimisena toimib lõputöö GNSS-tehnoloogia jätkuva innovatsiooni katalüsaatorina, luues aluse tulevastele teadus- ja arendusalgatustele. See on tööstuse sidusrühmade jaoks keskne ressurss, mis suunab neid GNSS-süsteemide edukaks integreerimiseks raudteeprojektidesse, aidates kaasa raudtee-ehitussektori üldisele ümberkujundamisele. Ülemaailmse mõjuga uurimine ulatub kaugemale oma vahetutest leidudest, soodustades rahvusvahelist koostööd GNSS-i integreerimisel ning mõjutades täpsust, tõhusust, ohutust ja tulevasi uuendusi globaalses ehitustööstuses.

SUMMARY

Title:

The possibilities of implementing integrated GNSS systems in railway construction works.

Relevance and issue:

The rapid development of technology in recent years has revolutionized various industries, and railway construction is no exception. Railway construction is a critical sector of infrastructure development where accuracy, efficiency and safety are paramount. The importance of precise positioning in railway construction cannot be overemphasized as it addresses the quality, efficiency and safety of the entire process. Although traditional methods have fulfilled their role, they have limitations that prevent further development. However, the traditional methods of carrying out railway works such as drilling, often encounter the obstacles of time-consuming and limited precision underground communications, especially those that do not touch the soil challenge. Recognizing the importance of accurate and reliable positioning in railway projects, the integration of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) is a promising solution.

Objective:

The purpose was to investigate the potential application of integrated GNSS systems in railway construction, trying to assess the advantages, opportunities, challenges and limitations associated with integrated GNSS systems in the field of railway infrastructure development. By understanding how GNSS systems can be used in different stages of railway construction, find out how this technology can contribute to task specification, control and supervision and highlight some challenges and limitations. These challenges include technological limitations, signal interference, as well as training and awareness issues.

Tasks:

1. Survey of existing scientific literature, systematic study of research articles and practical guides to create a comprehensive understanding of integrated GNSS systems.
2. Field work, which includes the actual execution of railway works using GNSS systems. Collection and analysis of positioning data, measurement results and operational documentation to assess impact on quality and efficiency.

3. The accuracy and efficiency of integrated GNSS systems in the execution of railway works were compared with traditional methods.
4. An analysis was conducted to investigate the potential challenges and limitations that may arise in the use of integrated GNSS systems in railway construction works.

Results:

A comprehensive approach was used to achieve the objectives, which included literature review, fieldwork and comparative analysis. A comprehensive review of existing educational materials and practical guidelines was conducted to gain a comprehensive understanding of integrated GNSS systems in various fields.

The analysis conducted highlighted the improved accuracy achieved with integrated GNSS technology compared to traditional methods, providing concrete evidence of its ability to mitigate risk and increase the accuracy of geodetic data in railway projects. Several challenges were identified, including technological limitations, signal interference and training issues. Addressing these challenges becomes critical with advancing technology, and the continued development of GNSS systems offers opportunities to overcome current limitations.

Data collected from the three railway projects were thoroughly analyzed to assess the benefits and challenges of using integrated GNSS systems in railway construction. The primary objective of the analysis was to compare the accuracy, efficiency and safety of traditional cable marking methods with integrated GNSS systems. The methodology involved an in-depth review of fieldwork experiences on various railway projects, highlighting the contrasting results of traditional methods compared to integrated GNSS systems and RTK technology. Insights from these case studies provide the basis for a comparative analysis of the accuracy, efficacy, and safety implications of these methodologies.

Taken together, these challenges—technology limitations, signal interference and training issues—highlight the need for tailored strategies and solutions. Overcoming these obstacles is important to fully realize the benefits of GNSS technology in the context of railway construction projects.

Conclusion:

In an effort to seamlessly integrate global navigation satellite systems into railway construction, several key challenges have been identified:

1. External factors such as environmental conditions and electronic equipment can degrade the quality of GNSS signals, causing potential disruptions to railway construction activities.
2. Faces limitations in adapting to different construction scenarios of railway projects, including tunnels, urban environments and densely vegetated areas.
3. Successful implementation of GNSS technology requires a skilled workforce capable of operating GNSS equipment and interpreting data.

Suggestions for solving the problems were made:

1. Collaborative efforts between GNSS technology developers, railway engineers and civil engineering experts can drive research to improve GNSS accuracy and adaptability. Adapting technology to specific scenarios through technological innovation is crucial.
2. Implementation of advanced signal processing algorithms and environmental monitoring systems can help mitigate signal interference. This includes real-time analysis and adjustments to maintain reliable GNSS operation.
3. Develop comprehensive training programs in cooperation with educational institutions and industry associations. These programs should include GNSS equipment operation, data interpretation and troubleshooting, ensuring a skilled and adaptable workforce.
4. Enable employees to participate in GNSS technology online learning platforms.
5. Involve employees in field work, when GNSS is used, in order to gain practical experience in using the GNSS system.

As a comprehensive exploration of challenges and solutions, the thesis acts as a catalyst for continued innovation in GNSS technology, laying the groundwork for future research and development initiatives. It is a central resource for industry stakeholders, guiding them to successfully integrate GNSS systems into rail projects, contributing to the overall transformation of the rail construction sector. Research with global impact extends beyond its immediate findings, fostering international collaboration on GNSS integration and influencing accuracy, efficiency, safety and future innovation in the global construction industry.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] T. K. K. K. A. L. Artu Ellmann, GNSS - Globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem geodeetilise täpsusega asukohamääramanguks, Tartu, 2022, p. 359.
- [2] L. R. P. D. T. P. Alfred Leick Ph.D, GPS Satellite Surveying, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2015, p. 807.
- [3] O. Montenbruck ja P. J. Teunissen, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer Cham, 2017, p. 1268.
- [4] H. L. E. W. Bernhard Hofmann-Wellenhof, GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more, Graz: SpringerWienNewYork, 2008, p. 501.
- [5] L. G. AG, „Leica Captivate Surveying Field Software,“ Leica Geosystems, [Võrgumaterjal]. Available: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/software/leica-captivate>. [Kasutatud 25 oktoober 2023].
- [6] Trimble Inc, "Trimble Access General Survey," 2019.
- [7] L. Adler, "How Smart City Barcelona Brought the Internet of Things to Life," 2016.
- [8] A. J. G. C. Abhinav Sharma, „Machine Learning Applications for Precision Agriculture: A Comprehensive Review,“ IEEE, 2020.
- [9] T. N. T. U. K. M. Takuya Nojiri, "How did the Geospatial Information Authority of Japan Respond to the 2016 Kumamoto Earthquake?," 2017.
- [10] Antcom Corporation, Autonomous Stuff LLC, NovAtel Inc., An Introduction to GNSS, Third Edition toim., Calgary: NovAtel Inc, p. 109.
- [11] H. L. M. L. Fei Wang, "GNSS Spoofing Detection and Mitigation Based on Maximum Likelihood Estimation," Beijing, 2017.
- [12] International GNSS Service, "Why Join the IGS?," International GNSS Service, 2020. [Online]. Available: <https://igs.org/why-join-the-igs#participate>. [Accessed 26 november 2023].
- [13] Trimble Inc., "Trimble Education & Outreach," [Online]. Available: <https://www.trimble.com/en/our-commitment/education-and-outreach/overview>. [Accessed 26 november 2023].
- [14] M. S. Hamdi Abdi, "Smart city: A review on concepts, definitions, standards, experiments, and challenges," *Journal of Energy Management and Technology (JEMT)*, vol. 4, no. 3, p. 6, 2020.
- [15] T. Chalishazar, "Smart Cities: How IoT is Driving Urban Development?," Peerbits, 2023.

- [16] A. S. Gillis, "Quantum key distribution (QKD)," 2022.
- [17] A. Kordts, "Continuous Variable Quantum Random Number Generator," Kongens Lyngby, 2019.
- [18] V. Jaarma, „Transpordi- ja liikluskorralduse õppekava Inseneripraktika (LTR028) aruanne,“ Tallinn, 2023.