



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SATELLITKAUGSEIRE KASUTUSVÕIMALUSTE
UURIMINE SILDADE HALDAMISES**

INVESTIGATION ON SATELLITE REMOTE SENSING APPLICABILITY IN
BRIDGE MANAGEMENT
MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Rasmus Sotnik

Üliõpilaskood: 122589 EATI

Juhendaja: Sander Sein

Tallinn, 2020.a.

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”202....

Kaitsmiskomisjoni esimees

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilase kood **122589**

Ehitusmajanduse ja - juhtimise
õppesuuna üliõpilasele **RASMUS SOTNIK**

Lõputöö kood: **EPM 60 LT**

Lõputöö juhendaja: **SANDER SEIN**

Lõputöö teema:

SATELLIITKAUGSEIRE KASUTUSVÕIMALUSTE UURIMINE SILDADE HALDAMISES

Investigation on satellite remote sensing applicability in bridge management

Lõputöö teema kehtivusaeg: **juuni, 2020**

Lähteandmed:

Juhised olemasolevate ehitiste hindamiseks, Euroopa maantee sildade kvaliteedi spetsifikatsioonid, erinevat uuringud kaugseire kohta.

Lõputöö sisu:

Seletuskiri:

1. Sissejuhatus
2. Probleemi käsitlev teoreetiline osa kirjanduse põhjal. Sildadele esitatavad nõuded. Sildade hindamise eri tasemed ja võimalused, kuhu alla kuulub kaugseire. Majanduslik tasuvusanalüüs.
3. Kaugseire tausta kirjeldus. Tehisavaradar kaugseire tutvustus. Riigiteede sildade ülevaade ja kogutavad andmed, liiklejast tulenevad nõuded. Majandusliku tasuvuse sisendid.
4. Lähtuvalt nõuetest, rahalistest vajadustest ja hetkeolukorrast teostada analüüs, kas kaugseire on tasuv ja mitut silda oleks vähemalt vaja mõõdistada, et see meetodika ära tasuks.

Kokkuvõtte eesti keeles

Resümee inglise keeles

Lõputöö väljaandmise kuupäev:

20.10.2017

Juhendaja:

Sander Sein

.....

Ülesande vastu võtnud:

Rasmus Sotnik

.....

Sisukord

SISSEJUHATUS	7
1 Konstruktsioonide hindamise printsiibid	8
1.1 Konstruktsioonide ohutus ning hooldatavus	9
1.2 Maksumuse vähendamine	10
1.3 Metoodika.....	12
1.3.1 Klassifikatsioon	12
1.3.2 Hinnangu tasemed.....	13
2 Uute metoodikate kasulikkus.....	15
2.1 Markovi Otsustusprotsess (MDP).....	15
2.2 Osaliselt Vaadeldav Markovi Otsustusprotsess (POMDP)	16
2.3 POMDP rakendamine infrastruktuuri haldamisel.....	18
2.4 Bayes'i lähenemine	21
2.4.1 Bayesi lähenemine praogasukoha näitel	22
3 Kaugseire	24
3.1 Tehisavaradar	24
3.2 Interferomeetiline tehisavaradar ja tema töötamisviisid.....	26
3.2.1 PSI metoodika	27
3.2.2 SBAS metoodika.....	32
3.3 Kaugseire seos sildadega	35
3.4 Kaugseire tasuvus.....	37
3.4.1 Uuring maantee ning linna kaardistamisest	37
3.4.2 Uuring mittelineaarsetest pinnaliikumistest.....	40
3.4.3 Uuring Kanada maantee sildadest.....	42

3.5	Kaugseire kasutamine ennetamiseks uhtumisi	44
3.5.1	Tadcaster'i silla varisemine.....	45
3.5.2	Jalakäijate silla varing Toilas	48
3.6	Teede kaugseire.....	49
3.6.1	Kaevandamisest tekkivad pinnadeformatsioonid	49
3.6.2	Karstilehtrite varajane avastamine teemaa-alal	52
4	Satelliitkaugseire võimalused	56
4.1	SILLE	56
4.2	SILLE sildade jälgimisel	59
4.3	SILLE kaevanduspiirkonna jälgimisel	61
4.4	Otsused ja soovitused	65
	Kokkuvõte.....	66
	Summary	67
5	Kasutatud kirjandus.....	68

SISSEJUHATUS

Tänapäeva tehnoloogia kiire areng võimaldab infrastruktuuri jälgimiseks kasutusele võtta üha täpsemaid, kiiremaid ning odavamaid võimalusi mitte ainult Maa pealt vaid ka kosmosest. Euroopa Komisjoni ja Euroopa Kosmoseagentuuri elluviidava Euroopa kosmosepoliitika üks olulisem programm on Copernicus, mis on suunatud Euroopa Liidu võimekuse ning sõltumatuse suurendamiseks satelliitkaugseires. Maailmas ainulaadse kaugseire programmi Copernicuse rakendamine annab Maa kaugseires Euroopale strateegiliste teenuste ning taristu sõltumatuse ning pakub tasuta ning avatud juurdepääsu teenuste arendamiseks vajalikele andmetele kosmosetehnoloogia maapealsete rakenduste loomiseks.

2020. aasta seisuga on Eestis 1010 maanteerajatist, mille ülevaatus toimub visuaalsete vaatluste teel, ent on aeganõudev, pideva andmetevooga ning otsustajapõhine, mis tähendab, et nende seisundist puudub reaalselt arusaam. Käesolevas töös tutvustatakse erinevaid meetodeid, kasutades seoseid satelliitkaugseirega rajatiste deformatsioonide uurimisel. Tänu tehnoloogilistele arengutele ning uutele meetoditele, saame informatsiooni struktuursüsteemi seisundist, tuletada vajalikke sisendeid ja vastu võtta otsuseid haldamiseks infrastruktuursüsteemi läbi nende elutsükli. Uute meetodite kasutuselevõtmisega saame optimeerida informatsiooni väärtust seisundi jälgimise süsteemis.

Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks on lahti seletada kaugseire kasulikkus taristu haldamisel, vähendamaks seeläbi nii vahetuid kui kaudseid kulusid ning kindlustamaks turvatunnet nii rajatise kasutajale kui omanikule. Töös on välja toodud hindamise printsiibid, mis tutvustavad, milleks on üldse vajalik rajatise jälgida, seejärel käsitletakse kaasaegsete prognoosimudelite kasulikkust, mille kasutuselevõtmine annab võimaluse kasutada täistõenäosusel põhinevat hindamist. Lisaks tuuakse välja soovitusel rajatise haldamiseks ning ohtlike olukordade ennetamiseks kasutades erinevaid uuringuid ja reaalseid olukordi maailmast. Kuigi satelliitkaugseire on Eestis alles algfaasis, võiks me olla maailmas tee-rajajad just tänu väikesele pindalale ning tugevalt põimunud ametkondadele, mis annab eelise omavaheliseks operatiivseks koostööks uute meetodite rakendamisel.

1 Konstruktsioonide hindamise printsiibid

Vastavalt standardile EVS-EN 1990:2002 „Eurokoodeks: Ehituskonstruktsioonide projekteerimise alused“ tuleb konstruktsioon projekteerida ja ehitada järgmiselt:

- talub ehituse ja kasutusea jooksul kõiki esineda võivaid koormusi ja mõjureid nõutava töökindluse astmega ning säästlikult
- püsib ettenähtud otstarbeks kasutuskõlblikuna
- ehitamisel ja projekteerimisel tuleb vältida, kõrvaldada või vähendada ehitist ähvardavaid ohte [1].

ISO 2394 järgi on vajalik olemasolevaid konstruktsioone hinnata, kui:

- tekib vajadus kasutamisetstarbe planeeritavaks muutuseks või projektijärgseks kasutusea pikendamiseks
- töökindluse kontrollimiseks, näiteks maavärinate või liiklusmõju suurenemise korral, kui seda nõuavad ametkonnad, kindlustusettevõtted, omanikud jne
- esineb konstruktsiooni kahjustumine ajast tulenevate tegurite toimetel, näiteks korrosioon või väsimus
- esineb konstruktsiooni kahjustus erakorraliste koormuste toimetel [2].

Üks võimalus konstruktsioonide hindamiseks on määrata, kui usaldusväärne on konstruktsioon kandmaks praeguseid ning tulevasi koormusi antud ajaperioodil.

Kohe alguses tuleb paika panna kindlad tingimused eesmärkide hindamiseks, mis on vajalikud saamaks teada põhilisemad piirseisundid. Uurinud lisaks veel ka konstruktsioonide erisusi, saab anda hinnangu konstruktsiooni seisundist. Hinnangu saamiseks kasutatakse kahte põhilist meetodit: konstruktsiooni ohutuse tagamine ja hooldatavus ning kulude minimaliseerimine. Mainitud raamistik on välja toodud iseloomustamiseks eri meetodikatega kaasnevaid tulemusi ning määramatusi.

1.1 Konstruksioonide ohutus ning hooldatavus

Põhiline hindamise ülesanne on tagada konstruksiooni või tema osade püsijäämine koormamisel. Hindamine viiakse läbi järgmiste piirteisundite abil:

- a) Konstruksiooni või tema osade tasakaalu kadu (pöördumatu liikumine)
- b) Maksimaalse vastupanuvõime saavutamine
- c) Konstruksiooni või tema osa muutus mehhanismiks
- d) Konstruksiooni või tema osa ebastabiilsus
- e) Eeldatud konstruksioonisüsteemi järsk muutus uueks süsteemiks [3].

Hooldamise vähendamine viib üldiselt kasutuse piiramiseni ning seeläbi võib muutuda vajalikuks hinnata kasutuspiirteisundit. Kasutuspiirteisund sisaldab:

- a) Lokaalsed kahjustused, mis võivad vähendada konstruksiooni eluiga
- b) Vastuvõetamatud deformatsioonid, mis mõjutavad konstruksiooni kasutamist
- c) Liigne vibratsioon, mis põhjustab inimestele ebamugavust [3].

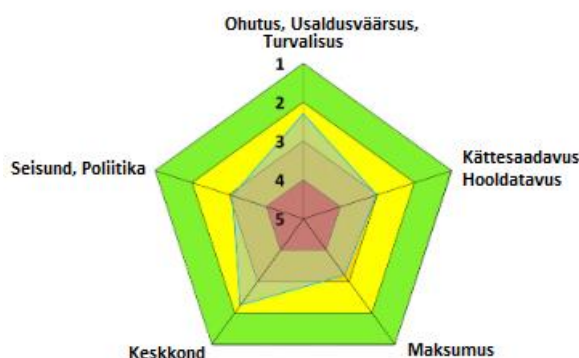
Ohutust ning hooldatavust hinnatakse erinevatel põhjustel, sealhulgas koormuste suurenemise, halvenemisest tingitud mõjude, suurte veoste tekitatud kahjude, probleemidest projekteerimisel ning ehitusvigade pärast, lisaks ka ehitusmaterjalide ning tööjõu kvaliteedi tõttu. Maksimaalsete koormuste suurenemine on tõenäoliselt põhiline põhjus konstruksiooni hindamiseks. Näiteks sildade puhul on ülemaailmne nõudlus suurendada lubatud veoste kaalu kauba transportimiseks.

Kõik konstruksioonid halvenevad ajaga ning iga konstruksiooni puhul on tulemus erinev. Põhilised konstruksiooni tugevust mõjutavad protsessid on korrosioon ning väsimus. Tükkide väljakukkumine konstruksioonist, möranemine ja kulunud välispind on põhilised halvenemist näitavad tegurid [3].

1.2 Maksumuse vähendamine

Viimastel kümnenditel on arendatud konstruktsioonide haldus-süsteeme minimaliseerima üldkulusid läbi ülevaatuste, hoolduste ning remonttööde, mille põhiliseks ülesandeks hinnata konstruktsiooni seisukorda antud hetkel ning prognoosida toimivust.

Olemasolevate sildade puhul on KPI (ingl. k. Key Performance Indicators) ehk tähtsaks toimivusnäidikuks ohutus ning hooldatavus, mis omakorda võivad olla kombineeritud teiste sisenditega nagu vastupidavus, stabiilsus, maksumus ja funktsionaalsus. Üldist toimivust on kujutatud alloleval diagrammil, mis põhineb Hollandi lähenemisel (Rijkswaterstaat, 2012) [4].



Graafik 1.1 [21] Silla hindamise diagramm (1 tähistab väga head tulemust, 5 väga halba tulemust)

Mida suurem diagrammi ala kaetakse tähtsa toimivusnäidiku väärtuste tulemusena, seda parem on silla toimivus ehk mida lähemale on erinevad väärtused rohelisele alale, seda parem tulemus saavutatakse [4].

Konstruktsioonide haldamise eesmärgiks on tagada õigeaegne informatsioon ehitise seisundist ning otsustada vaatluste, hoolduste ja remonttööde aeg. Ideaalses olukorras tuleks eelnevad tegevused teostada minimaalsete kuludega, häirimata ehitise (silla) tööd [5].

Hindamistulemused ehitise haldamisel peaks sisaldama sisendväärtuseid, arvutuskäike ning tulemusi, et vastu võtta ratsionaalsemaid otsuseid nii tööde teostamisel kui ka tuleviku tarbeks. Rakendatud hindamisrutiinid võiks olla koondatud kokku, et tulemusi saaks võrrelda ning seeläbi teha õigeid vaatlusi, hooldusi ning remonttöid [5].

1.3 Metoodika

Olemasolevate ehitiste hinnangut saab teostada meetoditega, mis erinevad nii keerukuse kui teostuse poolest. Peamisteks eesmärkideks on analüüsida hetke kandevõimet ning ennustada tulevane jõudlus maksimaalse täpsusega, kuid minimaalsete meetmetega [3].

1.3.1 Klassifikatsioon

Ehitise hinnangu saab jagada kolme gruppi: mõõtmistel põhinev hinnang, mudelpõhine hinnang ning mitte-formaalne hinnang [3].

Mõõtmistel põhinev kasutatavuse hinnang ei põhine ehitise analüüsil vaid otsestel mõõtmistel (näiteks liiklusloendused, koormustestid).

Sellist tüüpi hinnanguid on üldjuhul lihtne teostada [3].

Mudelpõhine ohutus ning kasutatavuse hinnangu gruppi kuuluvad sellist tüüpi hinnangud, kus koormuste mõju on kindlaks tehtud mudelpõhisel struktuuranalüüsil. Selle meetodiga saab modelleerida kande- ning kasutuspiirseisundi. Mudeltoiming koosneb kolmest komponendist:

- a) koormuste ning vastupanu andmete omandamine
- b) ehitismudelite koormuste mõju kalkulatsioon
- c) ohutuse ning kasutatavuse kontroll

Enamik hindamisrakendused on protsessipõhised ehitismudelid, erandiks on ainult eelmainitud mõõtmistel põhinevad kasutatavuse hinnangud [3].

Mitte-formaalse hinnangu alla kuuluvad hinnangud, mis põhinevad inseneri kogemustel ja otsustel. Need on vähem või rohkem subjektiivsed ning võetakse kasutusele erandjuhtudel.

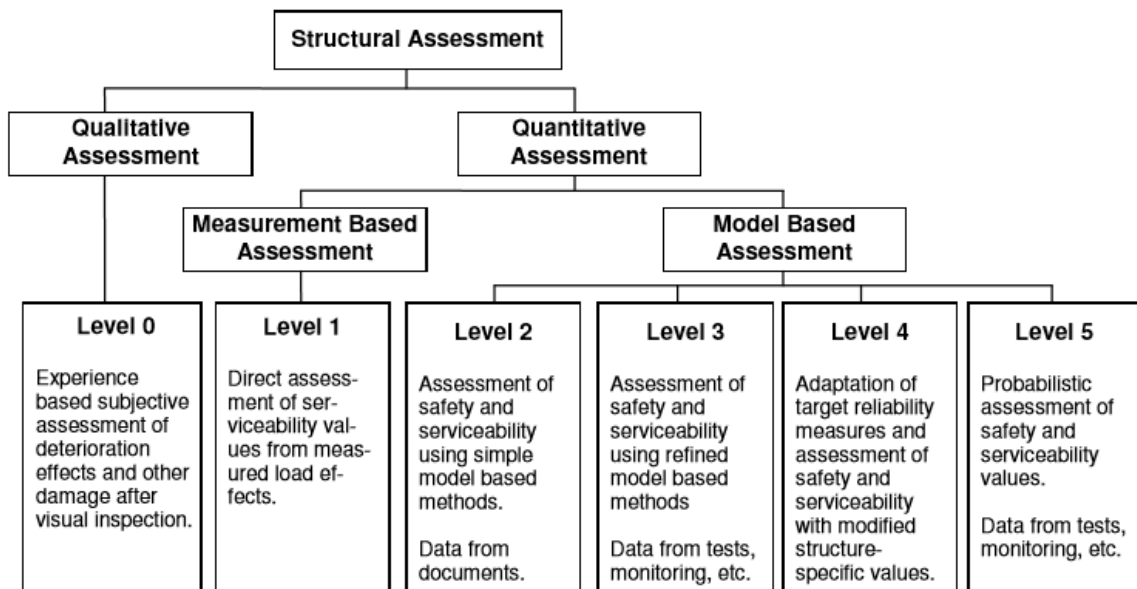
Enamik mitte-formaalsetest hinnangutest leiab aset olukordades, kus ehitise seisundit on hinnatud visuaalsel teel [3].

1.3.2 Hinnangu tasemed

Hindamise tasemed erinevad oma keerukuse poolest. Soovituslik on alustada hindamist lihtsatest, kuid konservatiivsetest meetoditest. Juhul kui sellised viisid ei toimi, liikuda edasi keerukamate tasemetete juurde. Rajatise hindamine jaguneb kvalitatiivseks ning kvantitatiivseks hindamiseks, kus viimane jaguneb omakorda veel mõõtmispõhiseks ning mudelpõhiseks hindamiseks.

Üldised alused rajatiste hindamiseks saab välja tuua järgnevate tasemetega, mis on kasutusel näiteks Ühendkuningriigis maantee sildade hindamisel, kuid on siiski vaid üks võimalikust klassifikatsioonist, mida maailmas kasutatakse [3]:

- a) tase 0 – visuaalne ülevaatus
- b) tase 1 – mõõtmistel põhinev hindamine
- c) tase 2 – osavaruteguritega dokumentidel põhinev hindamine
- d) tase 3 – tase 2 koos täiendava uurimisega (katsetega) hindamine
- e) tase 4 – rajatise vastupidavuse usaldusväarsuse hindamine
- f) tase 5 – täistõenäosusel põhinev hindamine



Context of the Structural Assessment Levels

Graafik 1.3 [3] Konstruktsiooni hindamise tasemed

Rajatise seisukorra hindamise väljundiks on tema usaldusväärsus ehk mida täpsem on hinnang, seda usaldusväärsem on rajatis tema kasutajale. Tänu tehnoloogia arengule on võimalik rajatise üha täpsemalt hinnata eelistamaks konservatiivsetele meetoditele üha rohkem täistõenäosusel põhinevat hindamise mudelit, kuhu alla kuulub ka satelliitkaugseire.

2 Uute meetodikate kasulikkus

Meie infrastruktuurisüsteemid seisavad silmitsi vananemise, lagunemise ning ebasoodsate keskkonnatingimustega. Tehnoloogilised arengud lubavad arendada Struktuuri Seisundi Jälgimise (inglise keeles Structural Health Monitoring ehk SHM) süsteemi, tänu millele saame informatsiooni struktuursüsteemi seisundist, tuletada kasulikke ning vajalikke sisendeid ja seeläbi teha otsuseid haldamaks infrastruktuurisüsteeme läbi nende elutsükli. Kasutamaks eelnevaid andmeid efektiivselt, on vaja kasutusele võtta uusi meetodeid, millega saaks optimeerida informatsiooni väärtust SHM-süsteemis.

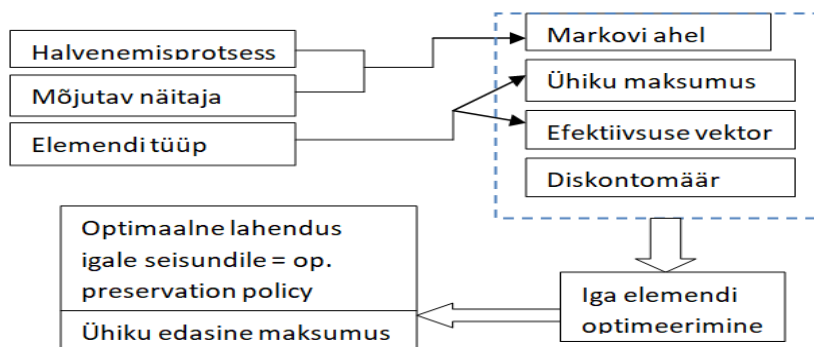
2.1 Markovi Otsustusprotsess (MDP)

Markovi otsustusprotsess oma olemuselt on aegdiskreetne stohhastiline juhtimise protsess, kus tulemused on osaliselt otsustaja enda teha ning osaliselt juhuslikud. See on oma nime saanud vene matemaatiku Andrey Markovi (1856 - 1922) järgi, kes tegeles stohhastiliste protsesside uurimisega. Markov oli huvitatud sõltumatu suvalise jada ulatuse uurimisest oma erimeelsuse tõttu Pavel Nekrasoviga, kes väitis, et sõltumatus oli vajalik Nõrga Suurte Arvude Seaduse (seadus, mille kohaselt juhuslike suuruste jada koondub tõenäosuse järgi mingiks konstandiks) tõestamiseks. Oma esimeses töös Markovi ahelate kohta (1906) tõestas ta ära NSAS-i ilma eelduseta sõltumatusele. Markovi otsustusprotsessi eelis seisneb tema suutlikkuses ühendada stohhastilised mudelid kindlatel matemaatilistel alustel põhinevate ebakindlate andmetega, andes reaajas optimaalse lahenduse [6].

MDP sisaldab järgmisi põhilisi komponente:

- a) hetke seisund
- b) parendamisega seotud tegevused (remont, moderniseerimine, asendamine)
- c) parendamiste tagajärjed struktuuri seisundile
- d) nende tegevuste maksumus

MDP-d on kasutatud pikka aega otsuste tegemiseks. Näiteks Šveitsi Maanteeamet kasutab seda sildade haldamiseks KUBA tarkvaras. KUBA-MS –s on hindamise aluseks struktuurielemendid, mis jagunevad segmentideks. Mõjutav näitaja on seotud iga segmentiga vastavalt tema mõjule keskkonnas. Tuvastatud protsessid hinnatakse viiepallisüsteemis ühest (hea seisukord, vigastused puuduvad) viieni (häireolukord, kohesed meetmed vajalikud). Markovi ahelaid kasutatakse prognooside saamiseks ning MDP kasutab otsuste määramiseks optimaalseid üldsuundasid [7].



Graafik 2.1 [7] Ülemineku maatriksite tulemused statistilise analüüsi vaatlusandmetest, Hajdin&Peeters, 2008

2.2 Osaliselt Vaadeldav Markovi Otsustusprotsess (POMDP)

Markovi Otsustusprotsess töötab eeldustel süsteemi kogu seisundi kohta. Teadmistel tuginev eeldatav süsteemi seisund võidakse leida vaatluse, mittepurustava katse või monitooriva tehnoloogiaga, kuid ükski nendest valikutest ei suuda tagada täielikku ning täpset informatsiooni süsteemi olukorrast. Probleemi lahendamiseks lõdvendab POMDP MDP eeldusi arvestamaks problemaatilisi teadmisi seisundist, lubades otsustada ebamääraste vaatluste põhjal [7].

POMDP on kokku võetud alloleval joonisel. Protsess algab seisundis s_i . Vaatlus oi on võetud aluseks tegevuse a_i teostuseks, vahetades läbi selle süsteemi seisundi s_{i+1} – ks, mis väljendub tulemusel r_i . Seisund on siiski teada ainult osaliselt, kuna süsteemi vaatlus sisaldab ebamäärasusi, mille tõttu saab seda kirjeldada läbi enda teadmiste (tõenäosuse) üle kogu seisundi.

Juhul, kui süsteem areneb selle tegevuse tulemusena, uueneb ka teadmine vastavalt eelnevale teadmisele, teostatud tegevusele ning saadud tulemustele. Selline lahenduskäik toimib Bayes'i reegli abil valemiga 2.1 [7]:

$$b^{a,o}(s_{i+1}) = \frac{p(o|s_{i+1})}{p(o|b,a)} \sum_{s_i \in S} p(s_{i+1}|s_i, a) b(s_i)$$

kus teostatud tegevus a ja vaatlus o asuvad teostatud kontrolli tegevuses ning seires; $p(s_{i+1}|s_i, a)$ on tinglik tõenäosus, $b(s_i)$ on hetke seisund, kirjeldamaks meie usaldust süsteemile seisundis s_i ehk $p(o|s)$ [7].

S : Süsteemi seisundi kogum (tavaliselt diskreetne)

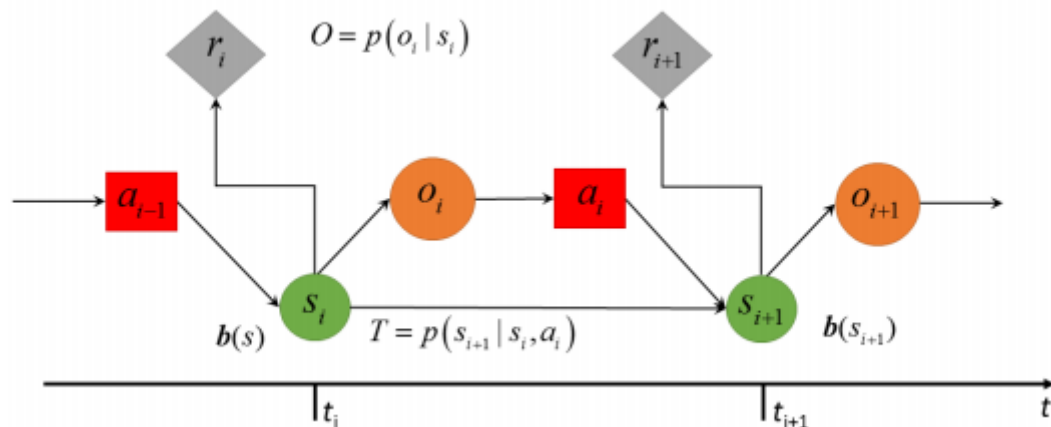
A : Võimalik, tavaliselt diskreetne, tegevuste kogum

T : Ülemineku mudel kirjeldamaks süsteemi arengut seisundist s_i kuni s_{i+1} tegevuse a tulemusena.

Ω : Vaatluste kogum, mis kirjeldab vaatluse tulemusi või monitoorimise meetodeid.

O : Vaatluse mudel, mis defineerib vaatluse tulemi o tõenäosuse, mil süsteem on seisundis s .

R : Tasu (või maksumuse) funktsioon näitab tasu väärtust $r \in R$. Tasu võib näidata sõltuvana hetke seisundist, eeldatavast tegevusest või kombinatsiooni mõlemast.



Graafik 2.2 [7] POMDP järjestikune otsustusprotsess vahelduvate tegevuste ja vaatlustega

2.3 POMDP rakendamine infrastruktuuri haldamisel

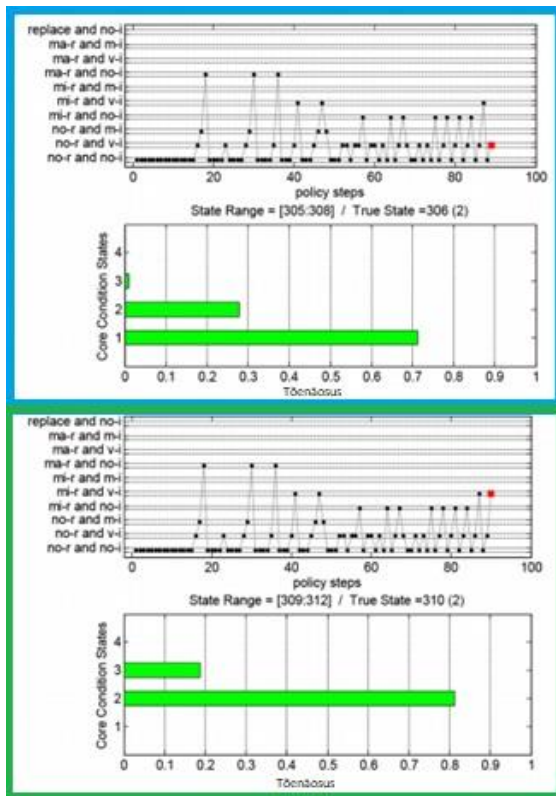
Suure arvutusmahu tõttu jääb tõenäoliselt POMDP vähem kasutatavaks kui selle MDP alternatiiv infrastruktuuri planeerimise ning eeskirjade tegevusvaldkonnas. POMDP pakub siiski mitmeid eeliseid, millest osa on päritud MDP-st, näiteks paindlik sõnastus, funktsionaalsus nii kindlaks määratud kui lõpmatus ruumis, sisaldades nii perioodilisi kui aperioidilisi seireintervalle, ideaalseid ning mitteideaalseid vaatlusi, ettemääratud kui ka tõenäosuslikke tegevusi, püsivaid ja mittepüsivaid keskkondi ning ka plaanides lõpmatuid ning lõplikke otsuseid [7].

POMDP kasutust saab selgitada näiteks otsuste langetamiseks terase korrosiooni kohta raudbetoonist kai dekiplaadi puhul, kus kasutatakse ruumilist stohhastilist korrosioonimudelit, mis näitab siirde tõenäosusmaatriksit [7].

Vastavuses AASHTO spetsifikatsioonidega, on eeldatud nelja erinevat seisunditaset:

- a) seisund 1 (alla 10% kahjustatud)
- b) seisund 2 (kahjustatud 10%-25%)
- c) seisund 3 (kahjustatud 25%-50%)
- d) seisund 4 (kahjustatud üle 50%)

POMDP rakendamist ühes võimalikus seisundis kahe järjestikuse tegevuse jaoks saab näha alloleval joonisel. Ülemisel graafikul olev struktuur on seisundis 2, samal ajal kui otsustaja omistab ainult 28% tõenäosuse selles seisundis. POMDP eeskiri näeb seejärel ette visuaalset vaatlust enne järgmist sammu (sinine kast). Kui see on tehtud, on tõenäosus kasvanud 81,2% peale, mis annab kinnitust, et süsteem tõesti on seisundis 2 (roheline kast). Selles seisundis näeb eeskiri ette väikeste remonttööde elluviimise ning näitab, et visuaalne vaatlus on valitud tasuvaimaks seire meetodiks, mida lõpuks näitab ka struktuuri nihkumine seisundisse 1 [7].



Available policy options:

- replace and no-inspection
- major-repair and monitoring-inspection
- major-repair and visual-inspection
- major-repair and no-inspection
- minor-repair and monitoring-inspection
- minor-repair and visual-inspection
- minor-repair and no-inspection
- no-repair and monitoring-inspection
- no-repair and visual-inspection
- no-repair and no-inspection

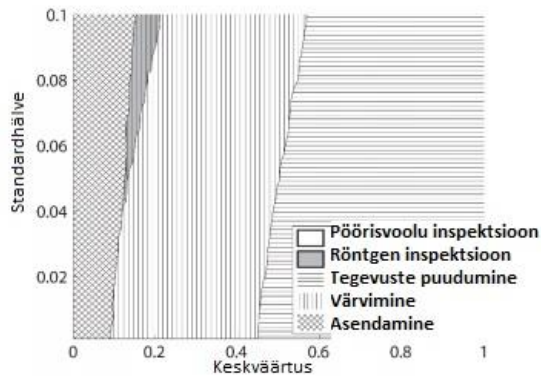
Võimalikud valikud:

- väijavahetus / ülevaatuse mitteteostamine
- suur-remont / monitoorimine
- suur-remont / visuaalne vaatlus
- suur-remont / ülevaatuse mitteteostamine
- väike-remont / monitoorimine
- väike-remont / visuaalne vaatlus
- väike-remont / ülevaatuse mitteteostamine
- ainult monitoorimine
- ainult visuaalne vaatlus
- tegevuste vajaduse puudumine

Graafik 2.3 [7] POMDP rakendamine kahe järjestikuse tegevuse jaoks

Eeskirja sammude jada (joonisel) näitab tüüpilist planeerimist infrastruktuuri haldamisel. Optimaalne on üldjuhul teostada väikeseid parandustöid varajases staadiumis. Juhtudel, kus eeldatakse pideva monitooringuandmete olemasolu, kasutab algoritm täpsemat (võrreldes visuaalse kontrolliga) informatsiooni ja soovib teostada sagedasemaid kuid odavamaid remonttöid, ennetamaks tõsiste kahjustuste teket [7].

POMDP väärtus tuleneb tema võimekuses koostada otsustamiseks vajalikud „kaardid“. Kui süsteemi seisundi indikaator on kindlaks tehtud, saab keskväertuse ja dispersiooni kaudu koostada tõenäosuse iga seisundi jaoks. Optimaalne kaart koostatakse tasemetega n kaupa, soovitades lahendusi ning vastavaid ülevaatusi. Selline kaart on kasulik otsustelangetamise protsessi tarvis. Näiteks on toodud allolev graafik, mis aitab otsustada, millist lahendust silla puhul kasutada [7].



Graafik 2.4 [7] Silla kolmanda taseme seisundihindamise kaart Schöbi & Chatzi 2016

POMDP hindab süsteemi seisundit, tuues välja ebamäärased või mittetäielikud ülevaatusandmed tegevuste planeerimiseks, samal ajal eeldades juhuslike meetmete olemasolu. Kuigi hetkel ei POMDP –d eriti ei kasutata, on võimalik tänu sellele meetodile võtta kasutusse tema arvutatud optimaalsed valikud, söötmaks andmed ette eelanalüüsimiseks ja määramaks kindlaks informatsiooni väärtuse Struktuuri Seisundi Jälgimise süsteemis (Structural Health Monitoring system) [7].

Markovi mudelit saaks rakendada silla seisundi indeksi muutuste uurimisel. Hetkel puuduvad selged ning heakskiidetud prognoosimudelid teedevõrgu kohta - lähtutakse kõige lihtsamatest mudelitest ning keskmistest hindadest. Tulemused saadakse pika viivitusega, kuna uutele sildadele omistatakse automaatselt SI 100 ning seda korrigeeritakse alles hiljem pärast ülevaatus. Saadud tulemused erinevad aastate lõikes, kuna ühes aastast vaadatakse ainult neljandik sildadest. Sildade seisundi indeksi viimiseks ühele aastale on vaja läbi viia vähemalt 3 ülevaatuset tsüklit, pärast mida saadakse üldisem trend. Seisundi muutused ajas annavad oluliselt rohkem informatsiooni sillapargi kohta, kui tavaline keskmine, kuna sellesse tegurisse on lisatud ka ajaline faktor. Markovi mudeli kasutusele võtmise puhul oleks võimalik süsteemi või protsessi ajas modelleerida (dünaamiline), mis teeks prognoosimise täpsemaks ning reaajas kasutatavamaks.

2.4 Bayes'i lähenemine

Bayes'i reegel on oma nime saanud Inglise kirikuõpetaja Thomas Bayesi järgi. Avalikkuse ette toodi Bayesi mõtted kaks aastat pärast tema surma 1763. aastal, kui Richard Price uuris Bayesi märkmeid ning neid täiendas ning avaldas mitmeid töid. Enamik arenguid on aga leidnud aset 20. sajandil tänu paljudele praktilistele probleemidele. Kõige kuulsam kasutus Bayesi teoreemile oli Enigma koodi lahtimurdmine II maailmasõja ajal. Samuti hakati kasutama Bayesi lähenemist 1951. aastal haiguste tekkimise tõenäosuse saamiseks, kus patsiendi ajalugu aitas leida lüli haiguse ning põhjuse jaoks, sellest tekkis ka side suitsetamise ning kopsuvähi vahel. Teoreem jõudis kasutusse ka 1960. aasta USA presidendi valimistel, kus Nixon ning Kennedy olid väga võrdsed. NBC telekanal leidis Princetoni statistikaproffessor John Tukey, kes analüüsis Bayesi järgi andmeid ning valis Kennedy võitjaks. Kuna valik osutus õigeks, kutsuti Tukey tagasi ka 1962. aastal ning lõpuks töötas ta NBC jaoks järgmised 18 aastat [8].

Kaks põhilist tegurit Bayesi reegli puhul on eelistada jaotamis ning tõenäosusfunktsioone. Võrreldes traditsiooniliste statistiliste lähenemistega, toimivad Bayesi meetodid efektiivsemalt tänu paremale eeltõenäosuse informatsioonile ning tänu edasistele uuendustele. Kuigi Bayesi meetodite arvutuste maht on suur ning kulukas, on tänu nüüdisaja arengutele hakatud seda lähenemist üha rohkem kasutama lahendamaks keerukaid ülesandeid. Kui Markovi ahel on mittedirigeeritud graafiline mudel ning võib olla tsükliline, siis Bayesi võrgustik on suunatud graafiline mudel. Tänu sellele saab Markovi ahel näidata sõltuvusi, mida Bayesi võrgustik ei saa, näiteks tsükliline sõltuvus [8].

Bayesi võrgud tagavad lähenemise, mis sisaldavad intensiivsete andmetega pilte koos varasema informatsiooniga. Sellise lähenemisega saab tuvastada näiteks pragude asukohti.

2.4.1 Bayesi lähenemine prao asukoha näitel

Bayesi reegel leidmaks prao asukohta koos intensiivsusega on näidatud valemiga 2.2 [9]:

$$f^{upd}(crack\ location|I(x,y)) = \frac{f^{init}(crack\ location)l(I(x,y)|crack\ location)}{\int f^{init}(crack\ location)l(I(x,y)|crack\ location)d\Omega}$$

$I(x,y)$ – testi tulemusena saadud pildi intensiivsus

$f^{init}(crack\ location)$ – eelneva teadmise põhjal tuletatud asukoha eeltõenäos

l – prao asukoha tõenäosus testi andmete põhjal

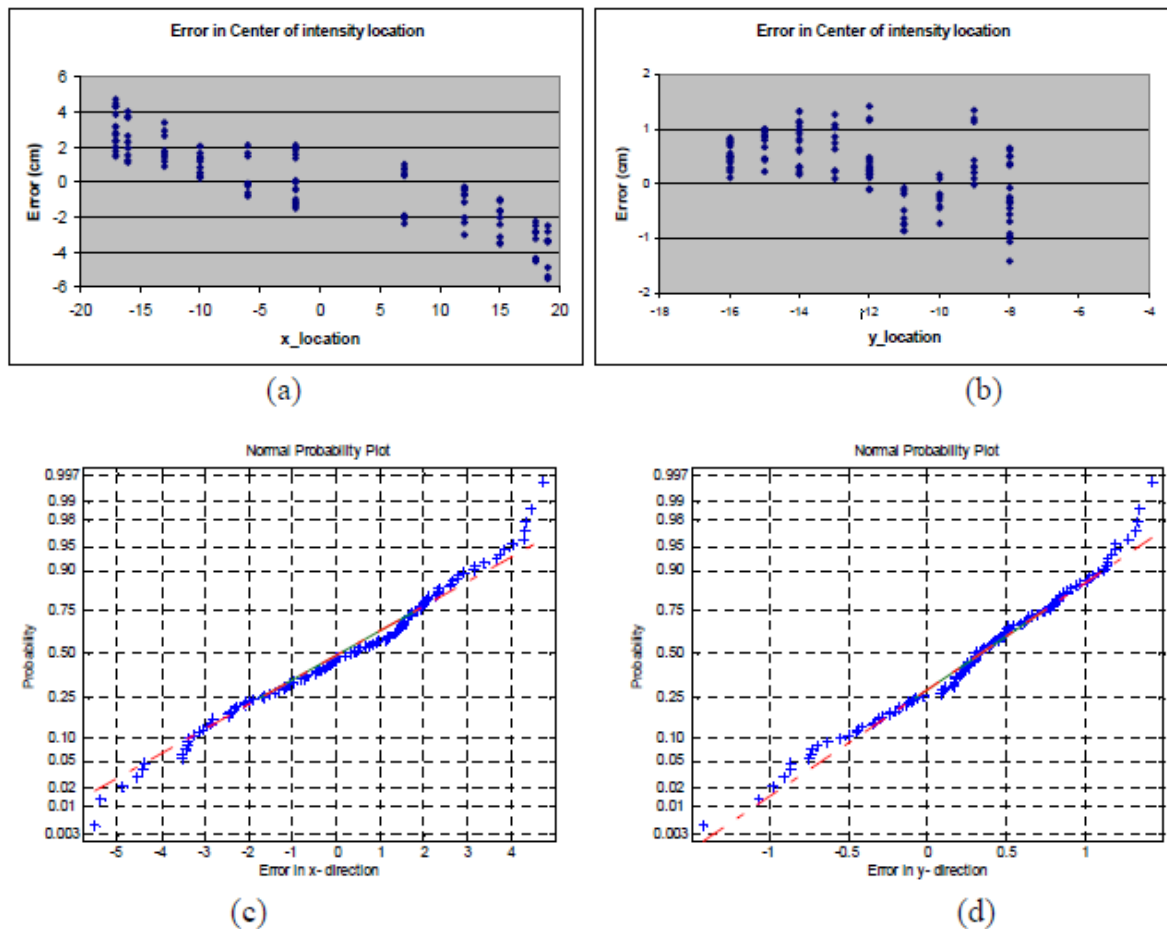
Bayesi lähenemise puhul on tõenäosusfunktsioon defineeritud kui suhe tegeliku prao asukoha ning meie saavutatu vahel ehk kui prao keskpunkt on koordinaatidega x,y , siis saadud tõenäosustihedus rändesimulatsioonis on defineeritud tõenäosusena [9].

Kuigi tehnika arenguga on arvutusmaksumus läinud odavamaks, on migratsiooniviiside arvutamine endiselt kallis ning täpse tulemuse saamine tõenäosuse arvutamisel peaaegu võimatu. Sellest tulenevalt tasuks kasutada kahte põhilist meetodit koostamaks tõenäosuskalkuleerijaid, milleks on:

a) Otsene pildi intensiivsus

Kõige lihtsam viis koostada tõenäosusfunktsioon antud piltidest on muuta antud pildi intensiivsus koheselt tõenäosusfunktsiooniks ehk tõenäosus, mille saame pildilt kui prao keskpunkt on punktis (x,y) , on proportsionaalne pildi intensiivsusega samas punktis. Koos Bayesi uuendustega on tõenäosusfunktsiooni kasutamisel saadud seitse pilti seitsme ajami tulemusena lõpliku jaotusena [9].

b) Mitmemuutujaga normaaludel intensiivsuse keskmest



Graafik 2.5 [9] Testiti 117 erinevat pragude paigutust erinevate ajamitega ning arvutati välja tegeliku ning eeldatava asukoha erinevus. Graafikud (a) ja (b) näitavad eeldatavat prao keskmega seotud viga ning graafikud (c) ja (d) veajaotuse normaalsobivust.

Kogu pildiandmete asemel valitakse välja ainult prao asukoha eeldatav intensiivsuse kese. Simuleerides paljusid pragusid, tehti kindlaks, et eeldatavale asukoha veale iga ajami tulemusena järgneb kindel suund, mida iseloomustab mitmemuutujaga normaaljaotus, mis annab tõenäosuse intensiivsuse keskmest juhul, kus prao kese asub punktis (x,y) . Kasutades Bayesi uuendusi koos tõenäosusfunktsiooniga ja seitsme ajami tulemusel saadud piltidega, saadakse lõplik jaotus [9].

Ülevaatus täpsus on väga kriitiline eelduste tegemiseks ning hinnangus sisalduv viga või ebamäärasus võimendub üsna suuresti prognoosi rakendamisel. Bayesi lähenemine tagab suurema täpsuse, kui on tõhusam interpretatsioon tegeliku ning eksperimendi vahel [9].

3 Kaugseire

Kaugseire on objektide kohta informatsiooni kogumine mittekontaktsel meetodil. Kõige sagedamini mõõdetakse Maal asuvaid objekte lennukitelt või satelliitidelt. Kaugseire on kiiresti arenenud koos kosmosetehnoloogia arenguga ning on kujunenud oluliseks teadus-arendus ja ettevõtluse valdkonnaks. Hetkel on Eestis kõige olulisemad rakendused seotud veekogude, metsanduse, põllumajanduse ning atmosfääri uuringutes ja seires.

Kaugseire võib jagada taimkatte kaugseireks, mis tegeleb maakasutuse ning selle muutuste uurimisega. Veekogude kaugseireks, kus kasutatakse mitmeid erinevaid uurimismeetodeid sõltuvalt keskkondade keerukusest, näiteks füüsikaliste aluste uuringud, satelliidimõõtmised ning atmosfääri uuringud õhu- ja veesõidukitelt. Kolmandaks on atmosfääri kaugseire, kus pööratakse suurt tähelepanu ultraviolettkiirguse uurimisele ning viimaseks radarseire, kus teostatakse mõõtmisi tehisava-radariga lennukilt või satelliidilt. Kõigile kättesaadav Google Earthis kasutatav ülemaailmne kõrgusmudel ongi mõõdetud interferomeetrilise tehisava-radariga.

Kaugseirega tegelevad töörühmad Eesti suurimates ülikoolides nagu TalTech, Tartu Ülikool, Eesti Maaülikool kui ka näiteks Riigi Ilmateenistus ning Maa-amet.

3.1 Tehisavaradar

Tehisavaradari (SAR) satelliidid koguvad pilte Maa pinnalt emiteerides radarisignaale. Saadud peegelduse tulemusi analüüsitakse. Tänu SAR satelliitide tiirlemisele peatamatult ümber meie planeedi, on võimalik koguda ühe asukoha kohta fotosid üle pika ajaperioodi. SAR andmekogumite uurimisel saab maapinna deformatsiooni muutumist ajas jälgida ja saadud tulemusi kasutada edukalt paljudes valdkondades. Kõik SAR anduritega varustatud satelliidid tiirlevad Maa polaarorbiidi vahetus läheduses, kõrgusel 500 - 800 kilomeetrit maapinnast.

LiDARi ning SARi erinevused tabelis 3.1 [10]:

LiDAR	SAR (tehisavaradar)
Ilmastikust sõltuv (pilved blokeerivad mõõtmist)	Pidev ülevaade (näeb läbi pilvede)
Väga kõrge-resolutsiooniga andmed. Võimaldavad avastada metsasuse tihedust ning väikeseid ehitusvigu	Jälgib pinnadeformatsioone – ideaalne analüüsimaaks infrastruktuuri seisukorda ning tulevase hooldustöid
Mõõdistus toimub lennates – Võimalus valida kuna ning kus andmeid koguda	Mõõdistus toimub kosmoses – info kogutakse orbiidilt satelliidi tempo järgi. (Infot saab koguda ka lennukilt)
Mõõdetavad alad selgitatakse välja enne mõõtmist	Mõõdetavad alad asuvad orbiidil.
Elektromagnetiline spektri skaala: infrapuna	Elektromagnetiline spektri skaala: mikrolaine
Üksiksageduslik	Multisageduslik

Kuna LiDAR vajab mõõtmiseks õhusõidukit, on tema kasutamine kallis ning ilmastikust sõltuv. SAR-tehnoloogia vajab aga ainult orbiidil olevat satelliiti, mis on majanduslikult kasulik, samuti suudab ta mõõta läbi pilvede. Mõlemad suudavad andmeid koguda nii öösel kui päeval [10].

GPS-i ja SAR-i erinevused tabelis 3.2 [10]:

GPS	SAR (tehisavaradar)
24-tunnine seire	Muutub ajas
Kindel mõõteala	Suureskaalaline mõõteala (kuni 10000km ²)
Kohene informatsiooni vajadus	Pikaajaline mõõtmine tagades igakuise informatsiooni saadavuse
Nõuab füüsilist kohalolekut maapinnal (vastuvõtja)	Võimalus jälgida kõike ilma eelnevalt asukohta teadmata

Tehisavaradar ning GPS töötavat tihti koos, täiendades üldist tulemust ning tagades infrastruktuuri lähedalt monitoorimise ning stabiilsuse. GPS suudab anda igapäevaseid analüüse kindla aja kohta, SAR aga anda võrdluse eelneva ning hetke olukorra vahel, pakkudes informatsiooni deformatsioonide kohta läbi aja, tänu millele võib see anda vajalikku informatsiooni otsustamiseks, kas rakendada kallimaid mõõtmismeetodeid või mitte [10].

Tehisavaradariga saab monitoorida objekte, millel on hea peegeldatavus. Tavaliselt on need majad, raudteed, sillad, katmata maaalad, kivid, sadamad, kaid, tammid või muud inimtekkelised ehitised. Katmata kallakuid saab samuti jälgida kukkuvate kivide või maanihete osas. Ideaalne objekt tehisavaradariga monitoorimiseks sisaldab tugevat pinda, nagu betoon, kivi või metall ning on paljude nurkadega, mis peegeldavad hästi. Pinnad, mis tehtud puidust või mõnest muust mittepeegeldavast materjalist, pikad ripsillad ning muud väikesed objektid ei ole SARiga mõõtmiseks sobilikud [10].

3.2 Interferomeetriline tehisavaradar ja tema töötamisviisid

Interferomeetriline tehisavaradar (InSAR) on ülemaailmselt kasutusel olev tehnoloogia, mida kasutatakse maapinna muutumiste jälgimiseks kohapealsete uuringuteta, kasutades polaarorbiitidel tiirlevate satelliitide anduritelt saadud andmeid. InSAR meetod kasutab SAR fotosid, et koostada pinnadeformatsioonidest kaardid, lisaks saab seda kasutada ka muudel eesmärkidel, näiteks digitaalse kõrgusmudeli koostamisel. Kui reaalaaja töötamisviisid põhinevad objektidel mõõdistamistest nagu nivelleerimine ning kontrollpunktide ülespanemine saamaks järjepidevat informatsiooni koos mõõteandmetega märgitud piirkonnas, siis InSAR on võimeline saama andmeid koos mõõtetulemustega tohutu ala pealt suure tihedusega liikumatute konstruktsioonide kohta kindlatel päevadel.

Liikumissignaali avaldub faasina interferogrammis. Faaside arv sõltub liikumisulatusest ning satelliidi lainepikkusest. See vastab maatriksile, mis koosneb numbrilistest väärtustest piirkonnas $-\pi$ kuni $+\pi$ (faasi variatsioonid) ja on võimalik teisendada ümber kaardiks. Kui nihked interferogrammis on vaadeldavad ajas konstantselt ja proportsionaalselt, saab väita, et esineb lineaarne liikumine ning seega on pinnaliikumine peegeldatud aegteljel konstantsena. Teisalt, kui liikumine esineb ebamääraselt, keskendudes ainult mõnele üksikule pildile kogu mahust, on mitmeid muutusi tema intensiivsuses, pindalal ja/või suunas (vajumine, stabiilsus ja kerge muutub), siis esineb mittelineaarne liikumine. Mittelineaarne pinnaliikumine peegeldub erinevates suundades aegreal ning ei pruugi olla kergesti märgatav [11].

3.2.1 PSI metoodika

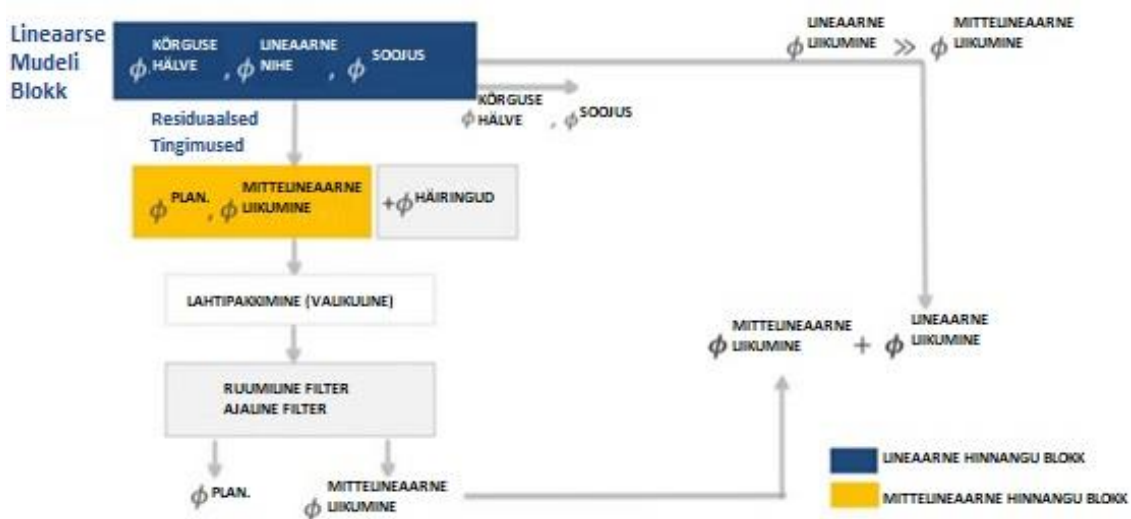
Diferentsiaalsed interferogrammid on sisendiks PSI ehk Püsiva Hajutuse Interferomeetria (ingl. k Persistent Scatter Interferometry) töötlemisahelatele. Traditsiooniline PSI põhineb teadmisel, et liikumisel on aja jooksul konstantne variatsioon, samas kui signaali paljundamist mõjutavatel atmosfääri häiretel see puudub, tänu millele on see soodsaim viis maapinna muutuste jälgimiseks. PSI põhised algoritmid on igapäevased vahendid tuvastamiseks konstantseid pinnaliikumisi koos radaripiltidega kindlal ajavahemikul. Iga interferogramm sisaldab erinevaid komponente, mis on seotud erinevate potentsiaalselt mõõdetavate ja järgnevates protsessisammudes kasulike suurustega. Interferogramm sisaldab siiski ka komponente, mis ei ole pinnaliikumise juures vajalikud. Nende eesmärk on nad algfaasis hoopis eemaldada, nägemaks pinnaliikumisi. Viimane on saavutatud läbi PSI algoritmide. Kahte lahusolevat komponentide blokki saab asetada lineaarsesse ja mittelineaarsesse blokki. Lineaarset blokki saab lihtsasti hinnata tänu tema otsesele seosele lineaarses lähtemudelil. Mittelineaarne blokk vastupidiselt aga on keerukam, kuna puudub seos algse mudeliga [11].

Järgnev võrrand näitab võimalikke etapi tingimusi, mis esinevad interferogrammis:

$$\phi_{\text{KOKKU}} = \underbrace{\phi_{\text{KÕRGUSE HÄLVE}} + \phi_{\text{LINEAARNE LIIKUMINE}} + \phi_{\text{SOOJUS}}}_{\text{LINEAARNE BLOKK}} + \underbrace{\phi_{\text{MITTELINEAARNE LIIKUMINE}} + \phi_{\text{PLANEERIMINE}}}_{\text{MITTELINEAARNE BLOKK}} + \phi_{\text{HÄIRINGUD}}$$

Graafik 3.1 [11] Etapitingimused interferogrammis

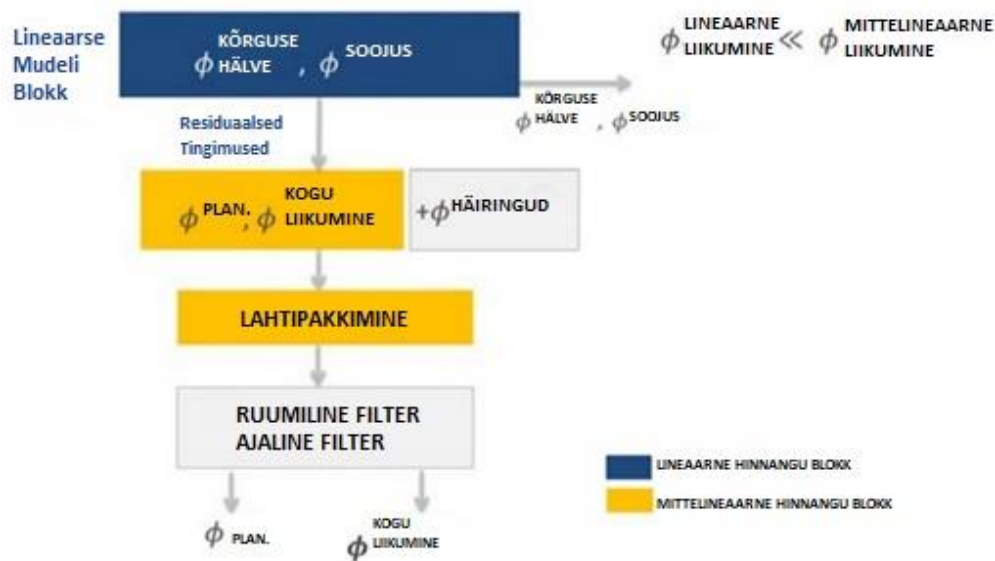
Teatud puhkudel kasutab PSI meetod ajas sisendina algset lineaarset nihkemudelit, isoleerimaks mittelineaarsed komponendid ning tagades väikese varieerumise lineaarse ja nõrga mittelineaarse liikumise vahel. Tänu sellele on PSI lineaarse mudeli meetodid võimelised saama mittelineaarse liikumise, samal ajal tekitades üldise lineaarse suuna ajas, ilma ebamääraseid samme tegemata [11].



Graafik 3.2 [11] PSI meetod lineaarse mudeli kohta. Seda saab kasutada ka piiritlemaks mittelineaarseid piirkondi.

Olukorras, kus pinnaliikumised ei käitu lineaarselt, vaid erinevate suundade ja variatsioonidega nagu kerke ning vajumise perioodilisel vaheldumisel, ei saa atmosfääri hindamiseks lineaarset deformatsioonimudelit kohaldada. See on seotud atmosfääri ning liikumise käitumisega ajas ning ruumis, kus neil on ühisosa spektraalses/ajalises määramispiirkonnas. Uus lähenemisviis, mis näidatud alloleval joonisel, on seetõttu vajalik saamiseks täpseid mõõtetulemusi olenemata,

kas liikumine on lineaarne või mitte. Samuti on oluline aspekt lineaarse mudeli sidusus, tänu millele saab piiritleda alasid, mis on mõjutatud mittelineaarsest liikumisest [11].]



Graafik 3.3 [11] PSI meetod mittelineaarse mudeli kohta.

Interferomeetrilist sidusust võib pidada kõige õigemaks statistiliseks indikaatoriks, et välja selgitada, kas uuritud ala on mittelineaarse käitumisega. Eksisteerib kahte tüüpi sidususe indikaatoreid:

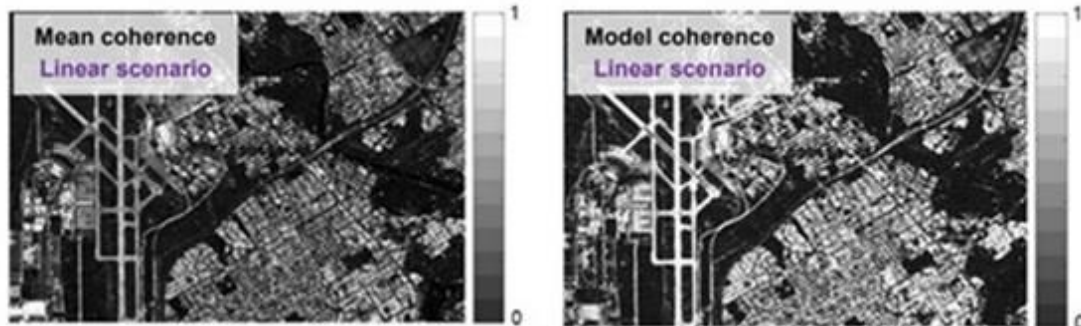
- a) Keskmise interferomeetriline sidusus, mis sõltub ruumi ja aja dekorrelatsioonist, kuid ei oma mõju liikumise mittelineaarsusest.

Keskmine sidusus on kahe vastava signaali etapi informatsiooni seose mõõtetulemus vahemikus 0 kuni 1. Sidususe astet saab kasutada kvaliteedi määramiseks, kus sidusus ühe lähedal näitab, et etapi info on usaldusväärne (kõrge sidususe määr) ning sidusus alla 0.3 tähendab, et piltidel on madal sidusus (ebaselge).

- b) Lineaarne deformatsioonimudeli sidusus, mis on tundlik mittelineaarsuse suhtes ja sõltub sellest, kuidas mõõteetapi areng on kohandatud kindlale deformatsiooni suunale.

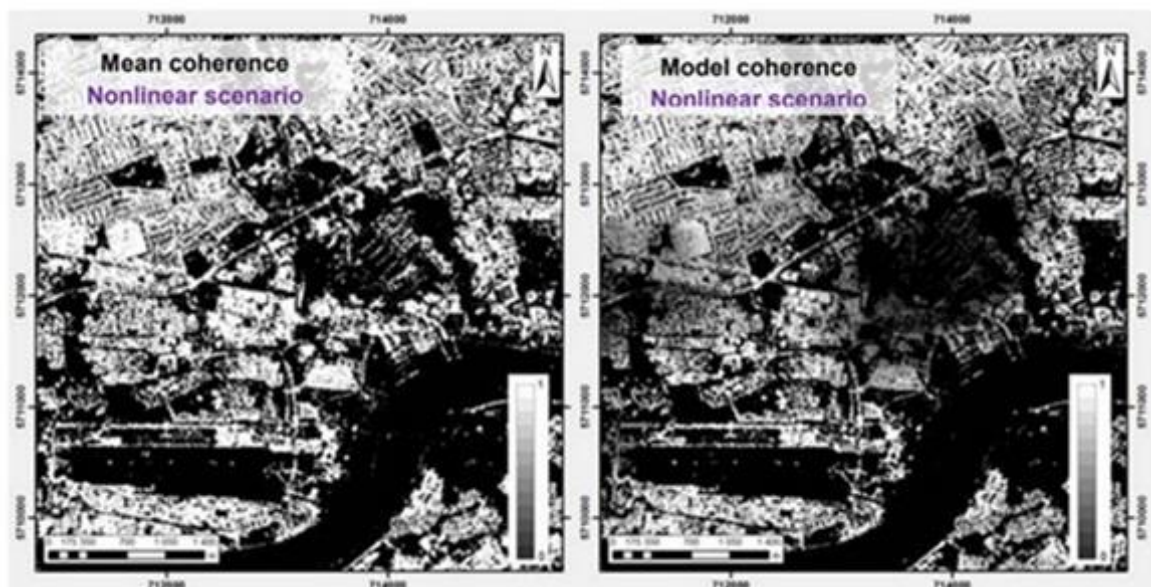
Selline sidusus on pigem kvaliteedi määramise vahend, mis on seotud millimeetrilise mõõtemudeligaga (keskmise iga-aastase nihke määraga). Väärtused on vahemikus 0-1, kus 1 näitab parimat sobivust. Viimane sõltub aga iga töötamise karakteristikutest, näiteks fotode arvust, mõõtepunkti müratasemest ning mudeli sobivuse usaldusväärsest [11].

Alloleval joonisel on näha võrdlus keskmise interferomeetrilise sidususe ja lineaarse deformatsioonimudeli vahel. Heledamad punktid keskmise sidususe puhul näitavad peegeldatud mõõdetavaid punkte, samas kui lineaarse mudeli puhul annavad heledad punktid hea hinnangu läbi deformatsiooniprotsessi [11].



Joonis 3.1 [11] Võrdlus keskmise interferomeetrilise sidususe (vasakul) ja lineaarse deformatsioonimudeli vahel (paremal) lennujaama lähedal.

Teisel joonisel on aga näha, et mittelineaarsel juhul kanalisatsiooni süsteemis, kus on märke liikumisest, on tegemist sidususe väärtuse vähenemisega ehk keskmine interferomeetriline sidusus näitab kõrget sidususe taset piirkondades, kus mudelsidususest saab välja lugeda madalat väärtust. Sellist nähtust mudelsidususe aladel tekitab tavaliselt mittelineaarne pinnaliikumine [11].



Joonis 3.2 [11] Võrdlus keskmise interferomeetrilise sidususe (vasakul) ja lineaarse mudelsidususe (paremal) vahel kanalisatsiooni tunnelites, näidates mittelineaarset liikumist.

Uurides seoseid lineaarsete ning mittelineaarsete deformatsioonide puhul, saab mõlema sidususe kohta teha üldistusi:

- a) Lineaarne ega mittelineaarne liikumispiirkond ei näita kumbki kõrget interferomeetrilist keskmist sidusust sõltumatult üle interferomeetrilise kuhja looduses või liikumises (vasakpoolsed pildid).
- b) Mittelineaarse liikumise aladelt on näha madalat mudelsidusust korrapärase lineaarse kiiruse hindamisel, tänu millele aitab lineaarne lähenemine märgata ja piiritleda mittelineaarseid alasid [11].

Saamaks kätte tulemused liikumisest, tuleb elimineerida mittevajalikud andmed, näiteks andmed atmosfäärist, jättes alles ainult maapinna liikumise interferogrammi. Mõlemaid sidususi saab võrrelda piiritledes mittelineaarseid pinnaliikumiste alasid, mis peavad olema isoleeritud atmosfääri hinnangust. Pärast seda saab kasutada ainult usaldusväärseid sidususpunkte lineaarsest sidususmudelitest. Punktide tuleb ruumiliselt jaotada, et hinnata ning interpoleerida atmosfääri täpselt koos ajalise ning ruumilise filtriga, mis põhineb stohhastilistel protsessidel ning pildi töötlemise teoorial [11].

3.2.2 SBAS meetodika

SBAS (Small Baseline Subset) on tehnika, mis tuvastab pinnadeformatsioone ning analüüsib aegruumi tunnuseid. Interferomeetrilise tehisavaradari SBAS algoritm koostab interferogramme tehisavaradari piltidest seades ülesse ruumilised ning ajutised baasliinid teostades nii singulaarsete väärtuste lahutuse ehk SVD (Singular Value Decomposition) interferogrammidest saadud deformatsioonide tulemusena läbi pika aja.

SBAS algoritmil on kõrgem proovivõttusagedus kui PS algoritmil, mille tulemusena saadakse suurema tihedusega pilt deformatsioonidest ning tänu millele saadakse parem arusaam deformatsiooni ruumilisest jaotumisest. Siiski on PSI meetod täpsem, kui mõõdetakse elamurajoone/linnu, teisalt on SBAS-i katvus laialtalaalikum. Mõlemad on aga sobilikud väikeste vajumite monitoorimiseks pika aja jooksul [12].

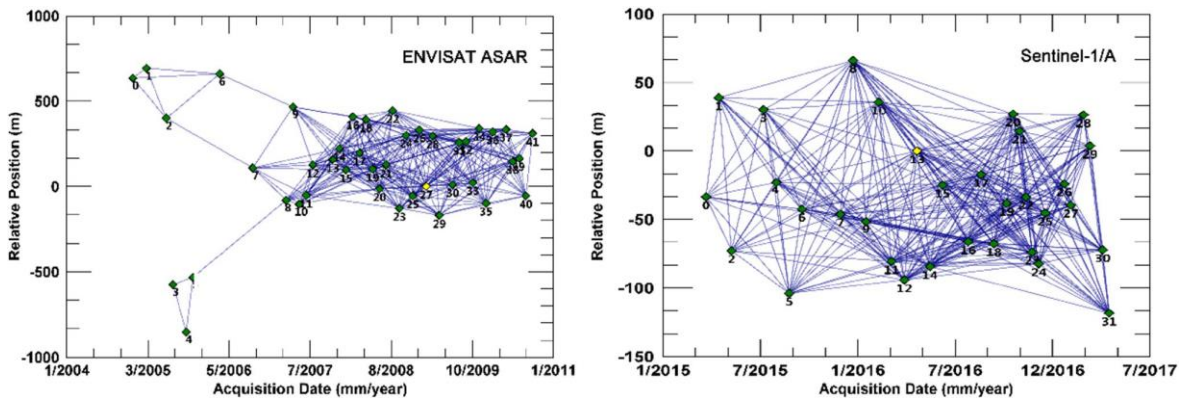
Levinud valem 3.1 interferomeetrias, mis näitab kompositsiooni faasi erinevustest interferentsi pildipaarides:

$$\delta\phi_{A-B} = \delta\phi_{def} + \delta\phi_{orb} + \delta\phi_{topo} + \delta\phi_{atm} + \delta\phi_{noise} \quad [12],$$

kus liidetavad näitavad vasakult paremale vastavalt deformatsioonist põhjustatud faasi erinevust, orbitaalseid vigu, topograafiat, atmosfäärist tingitud ja juhuslikke häireid.

SBAS kombineerib tehisavaradari piltide erinevat seeriad teistsugusesse komplekti suurendamaks sihtmärgi tuvastamise võimalust pannes paika ajutiste ning ruumiliste baasliinide pikkused ja eemaldades atmosfäärist tingitud faasihäired kasutades atmosfääri häirete karakteristikat, kus on küll ruumiline, kuid puudub ajaline seos [12].

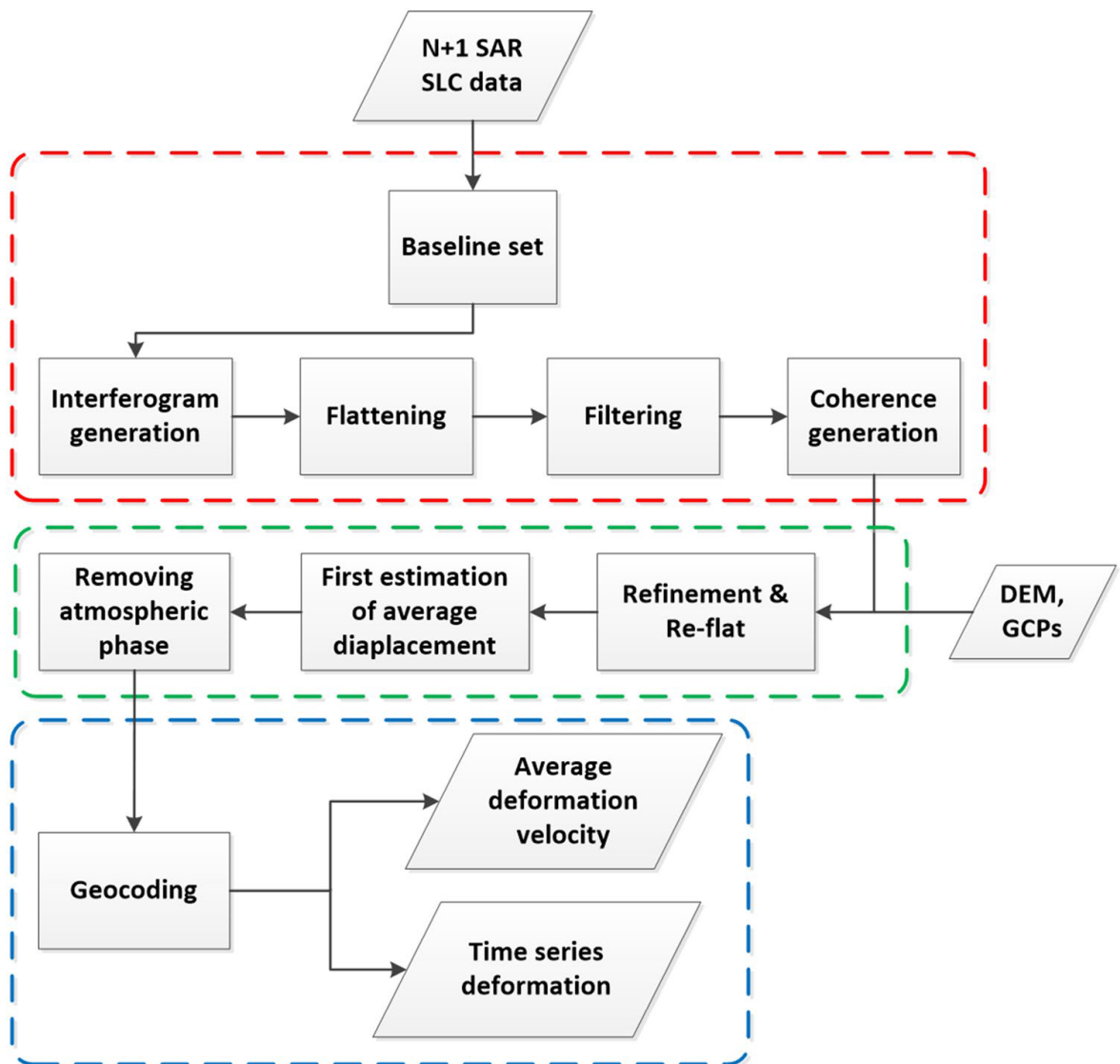
Ühendusdiagramm koosneb ajalise ning ruumilise baasliini asukohast, mis võimaldab näidata aja ning ruumi suhet piltide vahel.



Graafik 3.4 [12] ENVISAT ASAR ja Sentinel-1A andmete distributsioon baasliinide domeenis. SAR-andmed on tähistatud roheliste täppidega, kollased täpid tähistavad põhi-pilti (super master image), ehk referentspilti läbi protsessi. Iga sinine joon näitab kasutatud interferogrammi.

SBAS-i protsessigraafik koosneb kolmest osast:

- 1) Valimi koostamine - Ühendusdiagrammil põhineval põhipildiga koos registreeritud SLC (single look complex) pildi interferogrammide töötlemine, sisaldades tasandamist, filtreerimist ning sidususe loomist (ümbrisetud punase katkendjoonega).
- 2) Valimi liikmete kohta andmete kogumine - Seejärel lisatakse juurde digitaalse kõrgusmudeli ehk DEM (Digital Elevation Model) andmed rafineerimaks tulemusi. Pärast eelmainitud toimingut valitakse manuaalselt välja suhteliselt stabiilsed pinnapunktid ehk GCP-d (ground control points) abistamiseks orbitaalkorrekture ning absoluudi kalibreerimist. Lõpuks viiakse läbi pinna deformatsioonide inversioon. Topograafilistest ning atmosfäärihäiretest tekkinud tõrked eemaldatakse järjepanu läbi kahe inversiooni (ümbrisetud roheline katkendjoonega).
- 3) Tulemuste analüüs - Saadakse deformatsiooni määra ning pika aegseeriaga deformatsiooni kaardid läbi geokodeerimise (ümbrisetud sinise katkendjoonega) [12].



Graafik 3.5 [12] SBAS tehnoloogia algoritmi diagramm

SBAS tehnoloogia kasutab koherentseid alasid tuletamaks deformatsioone ruumiliselt keskmistatud (multi-looking) interferogrammidest, mis vähendavad ebamäärasusi ning parendavad hinnanguid. Kuigi ruumiline keskmistamine ei ole kohustuslik, on see abiks vähendamaks haavelmüra ning andmete mahtu. Haavelmüra on radaripildile iseloomulik omadus, mille tõttu paistavad ühtlase heledusega alad nagu veekogud, radaripildil mürased. Liigseid interferogramme koos ristuvate baasliinide väärtustega SBAS algoritmides kasutatakse geomeetrilise dekorrelatsiooni mõjude piiramiseks.

3.3 Kaugseire seos sildadega

Viimastel aastatel on tehtud suuri jõupingutusi rahvusvaheliste teadlaste poolt leidmaks efektiivne viis deformatsioonide uurimiseks. Sillad oma keeruka asukoha tõttu on siiski ka praegu väga raskesti ligipääsetavad. Hetkel teostatakse enamikes riikides sildade seiret visuaalse järelevalve käigus, mis näitab aga väga vähe konstruktsiooni sisemist seisukorda. Korduvat vajumseiret teostatakse väga vähestel sildadel, mis on varustatud sisseehitatud anduritega [13].

Tänu kosmosetehnoloogia kiirele arengule viimaste aastakümnete jooksul, on järjepidev ning täpne sildade seire odava hinnaga hakanud saama reaalsuseks. Tänu InSAR-le saab jälgida sildu avastamiseks kahtlaseid vajumeid/deformatsioone kuude lõikes. Tänu sellele saab ajaliselt leida potentsiaalseid probleeme nende struktuursele tervisele ning välistada probleeme varasemates staadiumites. Eksisteerib kaks põhilist karakteristikut, mis muudavad sellise seireviisi ahvatlevaks. Esimene annab kõrgeresolutsioonilisi kahedimensioonilisi kujutisi deformatsioonidest üle kümnete ja sadade kilomeetrite. Teine põhjus seisneb suures deformatsioonide täpsuses, mis on kuni 1mm/aastas. Lisaks saab mõningaid andmeid vaadelda tagasiulatuval, saamaks andmeid minevikust. Radarinterferomeetia rakendamine võib vähendada seirekuluseid mitmete miljonite eurode võrra, andes samal ajal täpsema ja sagedasema jälgimisvõimaluse [13].

Satelliitpõhisel InSAR sildade seirel saab:

- a) kohale minemata jälgida sadu sildu samaaegselt ühe radaripildi põhjal ilma pilvede ning pimeduseta tänu satelliidi liikumisele üle mitme päeva.
- b) tuvastada ja mõõta mm-skaalal vertikaalseid vajumeid üle tuhandete punktide ühe silla kohta, sõltuvalt dekiplaadi pindalast ning pildi resolutsioonist.

- c) hinnata globaalseid tegureid nagu silla paiknevust, dekiplaadi hälbeid, soojusest tingitud deformatsioone, vundamendi paiknevust ja kriitilist vee/jää piiri.
- d) aidata tuvastata ja järjekorda panna silla vajalikke kohapealseid seireid.
- e) täiendada kohapeal tehtavat seiret analüüsimeks konstruktsiooni seisundit.
- f) kindlaksmääratud perioodilise vahetega jälgida silla hälbeid, arendamiseks silla terviklikkust ning hooldustöid ning vähendada silla ligipääsetavuse ning liikluse segamisega seotud probleeme [13].

3.4 Kaugseire tasuvus

Kaugseire tasuvus tuleb välja objekti mõõdistamisele kulunud ajast ning õnnetuste ennetamisest, mis lõpuks väljendub ka rahaliste kulude kokkuhoidmise näol. Tema eeliseks on suurte maa-alade kiire ning detailide rohke järjepidev kaardistamine rohkem tööjõudu ning -vahendeid kasutamata. Lisaks ei häiri kaugseire inimeste igapäevaelu. Järjepidev mõõdistamine annab tulemusi infrastruktuuri või mõne muu katastroofi ennetamiseks ning vältimiseks, mille materiaalne kahju võib ulatuda miljonitesse eurodesse, rääkimata elude kaotusest.

3.4.1 Uuring maantee ning linna kaardistamisest

Selleks, et hinnata kaugseire tasuvust, tuleb võrrelda seda teiste meetoditega sarnastes tingimustes, tehes vajalikke üldistusi saavutamaks ideaalolukord. Norra Transpordiameti ning TerraTeci koostöös valminud raportist saab välja tuua erinevates olukordades nagu maantee ja linnaala mõõtmisel teostatud võrdlused [14].

Kaardistamisel on kasutatud kolme eritüüpi mõõdistamist:

- a) Traditsiooniline seire (geodeesia) – vajalik koolitatud personal, kogumaks jalgsi üle kogu objekti andmeid GNSS vastuvõtjaga. Tänu sellele leitakse ülesse ka varjatud objektid nagu truubid, luugid jms, kuid on samas ohtlik töö teostajale, kuna mõõdistustööd leiavad aset keset liiklust. Samuti mängib kvaliteetse töö teostamisel olulist rolli ilm.
- b) Mobiilne Kaardistamise Süsteem (MMS) – kiire kaardistamise meetod, mis kindlustab ohutu tööde läbiviimise seda teostavale personalile. Samuti puuduvad liikluses suured takistused liiklejatele, kuna vilkuritega hoiatav mõõteauto saab sõita vastavalt kiiruspiirangutele. Mõõtmisel saadakse suur täpsus tänu sõidukile kinnitatud positsioneerimis-sensorigest, mis annab täpse punktipilve. Punktipilves on kergesti näha teemarkeering ning geomeetrilised objektid ning ebavajalikud objektid saab hiljem kergesti eemaldada, samas ka hiljem tagasi panna, kui peaks vajalik olema.
- c) Helikopterilt Kaardistamise Süsteem – erinevalt MMS-st, on siin puhul laserkiire nurk väga suur, tänu millele saab teostada seiret läbi kõrge taimestiku. See süsteem on sõltuv ilmastikuoludest, kuid suudab kiiresti ülesse võtta suuri maa-alasid ning ei mõjuta maapinnal liiklejaid [14].

Eeldatav ajakulu maanteel

Maantee kaardistamine on lihtne, kuna erinevaid objekte on vähe. Kuni 1km pikkusel maanteel on kõige kiirem viis traditsiooniline geodeetiline mõõdistamine. Kui geodeedil kulub mõõdistamiseks ning andmete töötlemiseks ligikaudu 12 tundi, siis helikopterilt mõõdistatud andmete töötlemise tõttu kulub selleks peaaegu 2 korda rohkem aega.

2km pikkusel objektil on ajakulu geodeesia ning helikopterilt mõõdistatu vahel juba sarnane, kuid siiski traditsioonilise geodeesia kasuks.

Pikkade objektide (10km) puhul on helikopterilt mõõdistamine kindlasti kõige kiirem ning kasulikum, samuti ohutum. Kõikidel puhkudel on MMS kõige aeganõudvam viis [14].

Tabel 1: Maantee, väike uuring, <1km pikkune			
Mõõtevahend/meetod	Vajalik mõõtjate arv	Mõõtmiseks kuluv aeg tundides (objektil)	Töötlemiseks kuluv aeg tundides
Traditsiooniline geodeesia	Geodeet	8	4
Mobiilne kaardistamine	Juht/Operaator Andmete töötleja	2	25
Helikopterilt mõõtmine	Piloot, Operaator Andmete töötleja	2 minutit	20

Tabel 2: Maantee, keskmine uuring, 2km pikkune			
Mõõtevahend/meetod	Vajalik mõõtjate arv	Mõõtmiseks kuluv aeg tundides (objektil)	Töötlemiseks kuluv aeg tundides
Traditsiooniline geodeesia	Geodeet	16	6
Mobiilne kaardistamine	Juht/Operaator Andmete töötleja	2	40
Helikopterilt mõõtmine	Piloot, Operaator Andmete töötleja	3 minutit	30

Tabel 3: Maantee, suur uuring, 10km pikkune			
Mõõtevahend/meetod	Vajalik mõõtjate arv	Mõõtmiseks kuluv aeg tundides (objektil)	Töötlemiseks kuluv aeg tundides
Traditsiooniline geodeesia	Geodeet	80	12
Mobiilne kaardistamine	Juht/Operaator Andmete töötleja	4	120
Helikopterilt mõõtmine	Piloot, Operaator Andmete töötleja	10 minutit	60

Tabel 3.1 [14] Eeldatav ajakulu maanteel

Eeldatav ajakulu linnas

Kuni 1km pikkustel tänavatel on traditsiooniline seire võrdne helikopterilt teostatud mõõdistamisega, kaldudes pigem geodeesia kasuks.

2km pikkuste tänavate puhul on seis suhteliselt sama, kaldudes siiski helikopterilt mõõdistamise kasuks võrreldel ajakulu.

Suurte alade puhul (10km) on kõige kiirem viis helikopterilt mõõdistamine, olles 2 korda kiirem viis kui MMS. Traditsioonilise geodeesia mõõtetunnid on siin teadmata, kuna projektid on keerulised mõõdistamiseks neid sellisel viisil. Linnade seirel on samuti MMS kõige aeganõudvam meetod [14].

Tabel 4: Linna-ala, väike uuring, <1km pikkune			
Mõõtevahend/meetod	Vajalik mõõtjate arv	Mõõtmiseks kuluv aeg tundides (objektil)	Töötlemiseks kuluv aeg tundides
Traditsiooniline geodeesia	Geodeet	30	8
Mobiilne kaardistamine	Juht/Operaator Andmete töötleja	3	50
Helikopterilt mõõtmine	Piloot, Operaator Andmete töötleja	3 minutit	40

Tabel 5: Linna-ala, keskmine uuring, 2km pikkune			
Mõõtevahend/meetod	Vajalik mõõtjate arv	Mõõtmiseks kuluv aeg tundides (objektil)	Töötlemiseks kuluv aeg tundides
Traditsiooniline geodeesia	Geodeet	60	12
Mobiilne kaardistamine	Juht/Operaator Andmete töötleja	4	90
Helikopterilt mõõtmine	Piloot, Operaator Andmete töötleja	5 minutit	70

Tabel 6: Linna-ala, suur uuring, 10km pikkune			
Mõõtevahend/meetod	Vajalik mõõtjate arv	Mõõtmiseks kuluv aeg tundides (objektil)	Töötlemiseks kuluv aeg tundides
Traditsiooniline geodeesia	-	-	-
Mobiilne kaardistamine	Juht/Operaator Andmete töötleja	10	250
Helikopterilt mõõtmine	Piloot, Operaator Andmete töötleja	18 minutit	130

Tabel 3.2 [14] Eeldatav ajakulu linnas

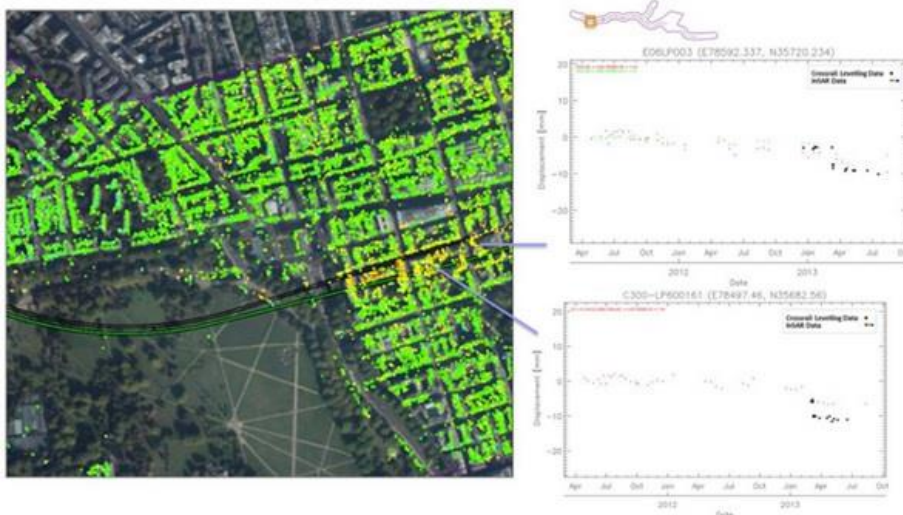
Lühemate teede puhul nii linnas kui maanteel tasuks kasutada geodeetilist mõõdistusmeetodit, kuna selle peale kulub kõige vähem aega ning saab ka täpse tulemuse. MMS annab küll täpse punkt pilve, eriti maanteel, kuid on väga aeganõudev. Helikopterilt skanneerimine tagab laiemal alal mõõdistamise tänu tema kõrgusele, mis võimaldab saada andmed ka tihedast taimestikust ning kaugemal teemaa-alast. Samuti tagab viimane, sarnaselt MMS-le, ohutuse töö teostajatele liikluses. Laserskanneerimine üldiselt tagab andmete täielikkuse ning neid saab kasutada projektide hilisemates etappides [14].

3.4.2 Uuring mittelineaarsetest pinnaliikumistest

Londonis, Crossrailis, teostati aastatel 2011 kuni 2013 Crossrail Ltd poolt seoste uuring kohapealse mõõdistamise ning tehisavaradari interferomeetria vahel mittelineaarsest pinnaliikumistest. Eesmärgiks oli tagada kontrollitud ülevaade hindamiseks stabiilsust kahe erineva töömeetodi kasutamisel. Esimeseks vahendiks oli RPSI (ingl. k Radar Persistent Scatter Interferometry) meetod ning teiseks meetodiks oli kohapealne mõõdistamine, mille teostamisel kasutati täpset nivelleerimise võrgustikku, digitaalseid teodoliite, hüdrostaatilisi rõhumõõdistamise võrgustikku ning kaldemõõdikuid [11].

Kohapealne mõõdistamine sisaldas reaalsajas mõõtmisi objekti ning ümbritseva keskkonna kohta, tänu millele saadi pidev andmetejada, InSAR on mitte reaalsajas töötav meetod, mis toimetab eraldiseisvate andmetega ning suudab hinnata suuri alasid, andes vihjeid kohalikest ning suurtest nihetest analüüsitud perioodil. Kuigi mõlemat tüüpi mõõdistamisel on erinev eesmärk, saab siiski kinnitada, et mõlemad viisid on komplementaarsed ning täiendavad üksteist, tänu millele saab kalibreerida mõlemaid andmeid kindlale olukorrale [11].

Kalibreerimise vajadus uuringus tuli esile näiteks Audley St ja Lees Pl ristmikul, kus märtsis 2013 esinesid nihked suuruses 5-6mm. Alloleval joonisel on mõningal juhul näha InSAR ning nivelleerimisandmete vahel konstantset erinevust, mis ongi seotud kalibreerimisega [11].



Selected TS from the correlation study of both techniques in the proximity of the junction of N. Audley St. and Lees Pl.

Joonis 3.3 [11] Audley St ja Lees Pl ristmik

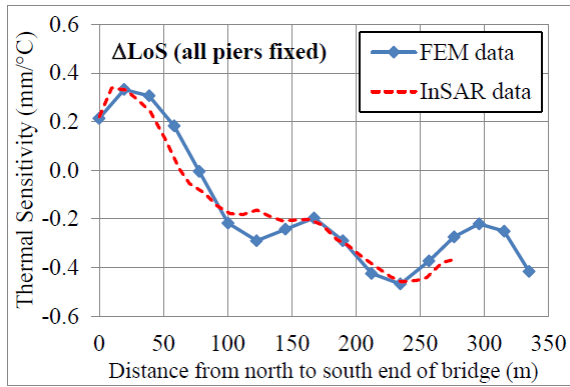
Läbi vaatluspunktide võrgustiku on võimalik uurida ka alasid, mis on jäänud InSAR pildile, kuid mida pole otseselt soovitud mõõta. InSAR võimaldab mõõdistada laiemat ala ning tänu sellele uurida tegevusi, millel võib olla regionaalne mõju, näiteks kanalisatsioonisüsteemide lahendusi [11].

Uuring tõi välja, et kombinatsioon mõlemast meetodist aitas kaasa pinnaliikumiste jälgimisele tunnelite ehitamise erinevates etappides, mis sisaldas näiteks liikumiste vaatlust enne tööde algust, ettevalmistustöid enne tunneli ehitust ning kaasnevate mõjutuste jälgimist, mis oli põhjustatud puurmasinatest ning sellele järgnevatest vajumistest ehitamise ajal. Juhtudel, kus eeldatakse suuri ning kiireid liikumisi, on oluline jälgida piisavalt satelliitmõõdistuste tulemusi, saamaks teada kõik erinevad sündmused. Kuigi interferomaatria ei suuda tagada reaajas andmete voogu nagu kohapealne mõõdistamine, saab tööde hilisemates etappides InSARi järk-järgult üha rohkem kasutada, kuna väheneb risk kriitiliste sündmuste tekkeks ning nihkeid ning liikumisi toimub vähe, mis omakorda võimaldabki kasutada odavamalt lahendust sündmuste jälgimiseks [11].

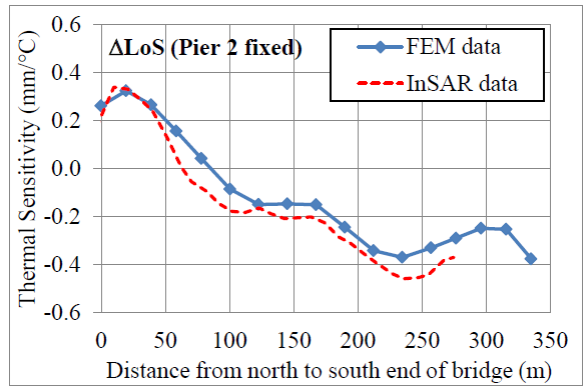
3.4.3 Uuring Kanada maantee sildadest

Kanadas oli 2016 aasta seisuga 11 644 maantee silla, millest ligikaudu ainult 60% oli heas või väga heas, üle kümnendiku sildadest aga halvas või väga halvas seisukorras, mis on rohkem, kui Eestis kõik maantee sillad kokku. Sillad on Kanadas kriitilise tähtsusega transpordivõrgu toimimiseks ning vajavad kiiremas korras hooldust oma vanuse tõttu - 81,7% maantee sildadest on ehitatud enne 2000. aastat. Olukorra teeb halvemaks ka vähene sildade vaatlus ning hindamine, hooldusest rääkimata [15].

2014. aasta jaanuaris avatud 335 meetri pikkust North Channeli silla üle St-Lawrence'i jõe uuriti, arendamaks välja tehisavaradaril põhineva silla deformatsioonide jälgimise tehnoloogiat. Uuringus selgus, et tehisavaradari andmete regressioonanalüüs andis parima sidususe kui sisestati kolm eraldiseisvat muutujat: kõrgus, temperatuur ning aeg. Näiteks, kui temperatuur jäeti välja, vähenes sidusus märgatavalt. Silla reelingud käitusid väga heade tehisavaradarile vajalike peegeldajatena tänu oma teravatele äärtele ning regulaarsetele vahedele üle silla. Tuvastati üle 3000 adekvaatse signaali [16]. Nihked temperatuuri muutustest tehisavaradari ning FEM (Lõplike elementide meetod) andmete vahel, olid võrreldavad ning lubavad tuvastamiseks võimalikke probleeme silla tugeudel.



Comparison of FEM and SAR data sets for thermal sensitivity of line-of-sight displacement (for actual bridge support condition: all piers fixed)



Comparison of FEM and SAR data sets for thermal sensitivity of line-of-sight displacement (for fictitious bridge support condition: only P2 fixed)

Graafik 3.6 [16] Nihked temperatuuri muutustest tehisavaradari ning FEM andmete vahel

Mõõtetulemuste analüüs näitas satelliidipõhise kaugseire vajalikkust maantee sildadel. Eelkõige optimeerimaks tulevasi hooldusi, suurendamaks konstruktsiooni elukaare pikkust, minimaliseerimaks liikluse häirimist liiga hiliste remonttööde tõttu, aga tagamaks konstruktsiooni terviklikkuse ka pärast looduskatastroofe nagu suured maavärinad ning üleujutused [16].

3.5 Kaugseire kasutamine ennetamaks uhtumisi

Uuristus ehk erosioon on voolava vee poolt tekitatud kulutus, mille tagajärjel kandub osa pinnasest minema. Sellist nähtust esineb näiteks sillasammaste juures ning tekkinud augud loovad soodsad tingimused silla kokkuvarisemiseks. Sillaomanikule on see suureks probleemiks, kuna uuristuse ennetamine on väga keeruline ning kohapealsed uuringud on üsna kallid. Erosioon on Ameerika Ühendriikides peamiseks põhjuseks sildade kokkuvarisemiseks (*National Academies of Sciences, Engineering, and M., 2009*) ning selle tagajärjel on viimaste kümnendite jooksul kokkuvarisenud sadu sildu üle maailma. Tänu tehnoloogia arengule on võimalik üha rohkem kasutada kaugseire võimalusi selliste õnnetuste vältimiseks.

Üldiselt teostatakse sildade seiret visuaalse vaatluse teel nii Eestis kui ka mujal maailmas, eeldades, et vaatleja suudab tuvastada probleemid enne ohu tekkimist. Inimese võime subjektiivselt hinnata ebatavalisi olekuid ning nähtusi objektipõhiselt on küll kasulik, kuid ei pruugi alati anda usaldusväärseid tulemusi (*Moore et al., 2001; Bennetts et al., 2016*). Interferomeetrilise tehisavaradari kasutamine võib olla aga lahendus jälgimaks deformatsioone sillal veepinnast kõrgemal. Selle kasutamine võimaldab sillaomanikule täiendavaid andmeid, mis visuaalse vaatluse käigus jääksid saamata nagu näiteks millimeetriskaalal toimuvad deformatsioonid. Kuna tehisavaradar toimib ööpäevaringselt läbi pilvede ning suudab tagada andmeid isegi kuni ainult mõnepäevase intervalliga, samal ajal kui visuaalne vaatlus toimub iga mõne aasta tagant, siis on võimalik saada andmeid nii üleujutusperioodil kui normaalse veetaseme ajal [17].

3.5.1 Tadcaster'i silla varisemine

Tadcaster'i sild on ajalooline 9-kaareline kivisild üle Wharfe jõe Suurbritannias. Sild on ligikaudu 100 meetrit pikk ning 10 meetrit lai, seda ületab kahesuunaline sõidutee ning kergtee silla mõlemal serval.

2015 aasta 29. detsembri õhtul kukkus ülesvoolul olev viies sammaskokku, põhjustades silla osalise kokkuvarisemise ning täieliku sulgemise, jagades linna kaheks. Samuti tekitas õnnetus probleeme side- ning kommunikatsioonisüsteemides, mis olid veetud silla kaudu ning rikkeid ümberkaudsetes veetrassides. Lisaks mõranes ka gaasitrass, põhjustades sadade elanike evakueerimise [17].

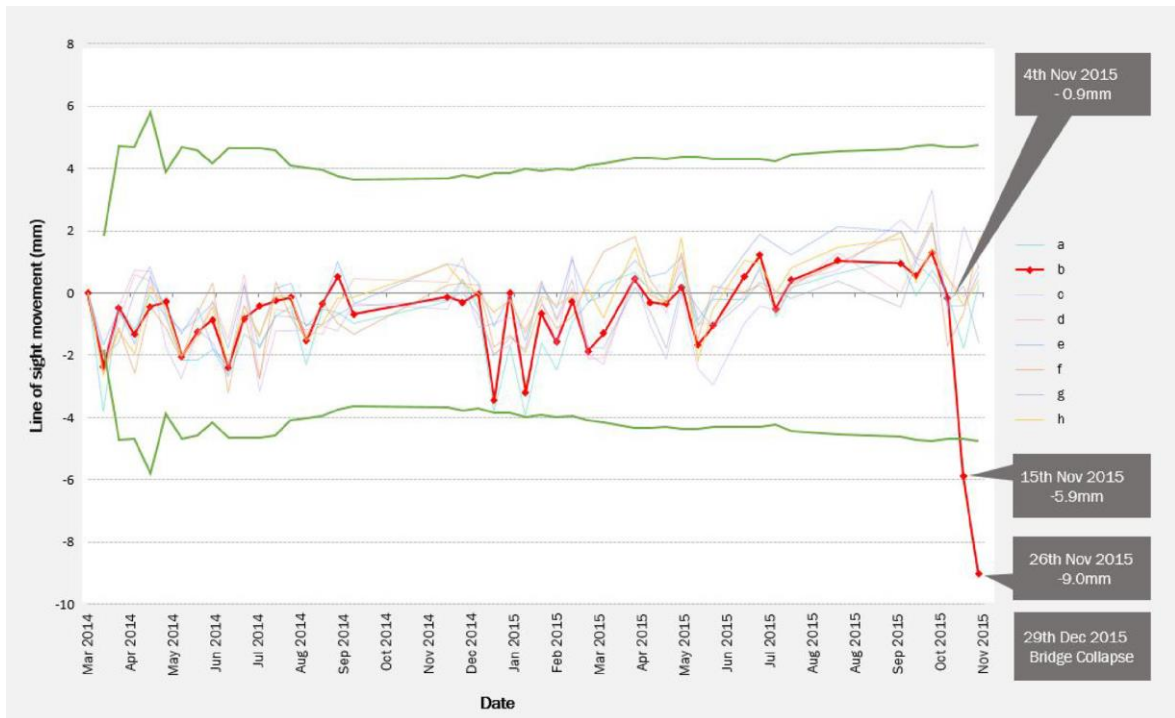
BBC uudised kuvasid õnnetust mitme nädala vältel igapäevaselt, näidates, kuidas õnnetus pööras pea peale kohalike elanike igapäevaelu. Näiteks oli kohalik lihapood suletud 16 päeva ning keldrikorrusel asuv ilusalong üleujutatud veetrassi purunemise tõttu.



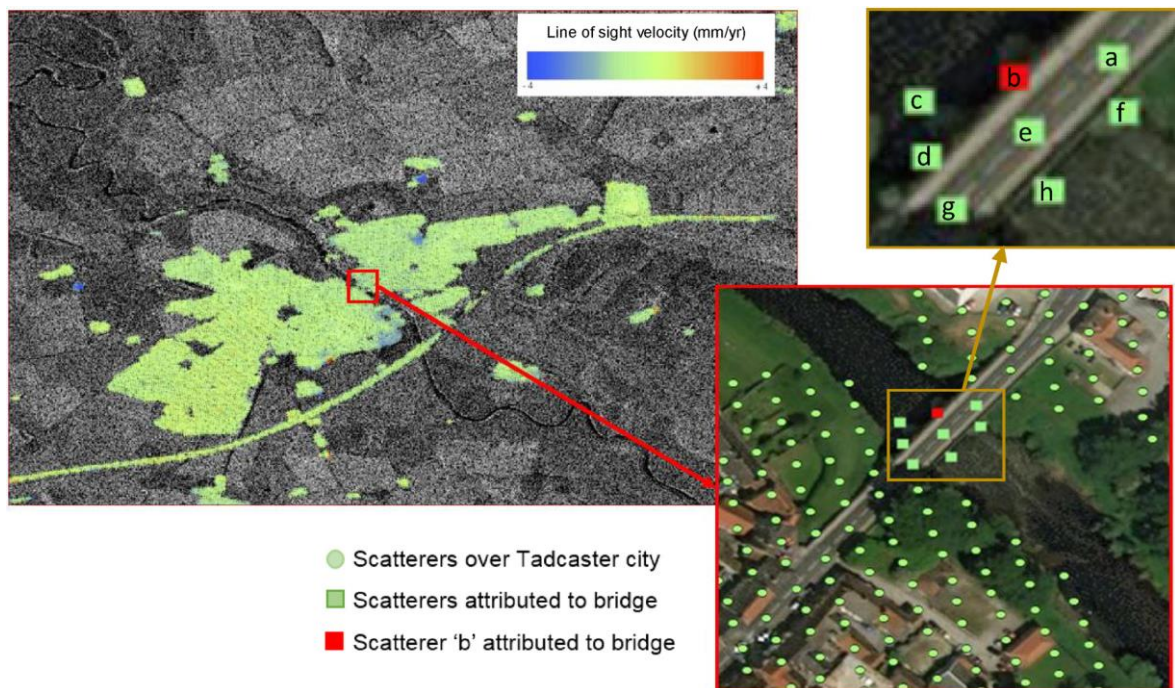
Joonis 3.4 [17] Silla skeem ja foto pärast õnnetust

Meetodeid analüüsima deformatsioone kokkuvarisemisele eelneval perioodil on erinevaid – näiteks PSI ning SBAS. PSI kasutab konstantseid peegeldajaid ning ei oma mingit mõju ajalistele ning ruumilistele interferogrammide baasliinidele. PSI põhineb punktide analüüsimisel, mis on seotud läbi interferogrammide seeria. SBAS vastupidiselt PSI-le aga omab mõju baasliinidele, kuid lubab ka analüüsida hajutatud sihtmärke. Uurimaks silla deformatsioone enne kokkuvarisemist, olidki võimalikud meetodid nii PSI kui SBAS, kuid konkreetsel kivisillal oli ainus peegeldajaks sobiv objekt metallist lambipost, mis oli omakorda veel varjatud satelliitide eest puu lehestikuga, siis otsustati kasutada SBAS meetodit [17].

Alltoodud graafikul on näha, et Tadcasteri sild oli üsna stabiilne jäädes kahe aasta vältel 2mm deformatsioonide piiresse. Pärast seda oli ainult üks ala sillal (punkt B), mis käitus kahtlustäratavana. Mõõtmistulemused 15. novembril ning 26. novembril 2015 näisid punktis B väga ebatavalistena ning registreeriti seetõttu potentsiaalse murekohana. Kuigi ei ole võimalik eristada täpset kohta sillal, on siiski võimalik aru saada, et punkt B asub silla keskel ülesvoolupoolisel küljel. See näitab otsest seost silla asukoha ning kokkuvarisenud samba vahel [17].



Graafik 3.7 [17] Sillal asuvate punktide nihked



Joonis 3.5 [17] SBAS tulemused Tadcasteri sillal

3.5.2 Jalakäijate silla varing Toilas

2020. aasta märtsis varises kokku Toilas rannaalalt Oru parki viiv sild. Visuaalsed vaatlused kinnitasid juba paar aastat, et sild on varisemisohtlik, kuid kõigest kuu aega varem valminud ekspertiis kinnitas, et sild on jalakäijatele sobilik. Arvestades, et silda kasutab aastas üle 100 000 inimese, oleks õnnetus võinud väga suurt kahju tekitada. Satelliitkaugseirega oleks võimalik olnud suuri deformatsioone märgata õigeaegselt, tänu millele oleks ekspertiisitulemus võinud olla selline, mis oleks silla omanikule andnud märku vajalikest remonttöödest kiiremas korras. Hetkel pole enam võimalik olemasolevat silda taastada ning on vajalik ehitada uus. Sarnaseid halvas seisus, kuid suure kasutatavusega sildu on Eestis veel, nagu näiteks Hüüru jalakäijate sild.



Joonis 3.6 Jalakäijate silla varing Toilas. Foto: Rene Kundla / ERR.

3.6 Teede kaugseire

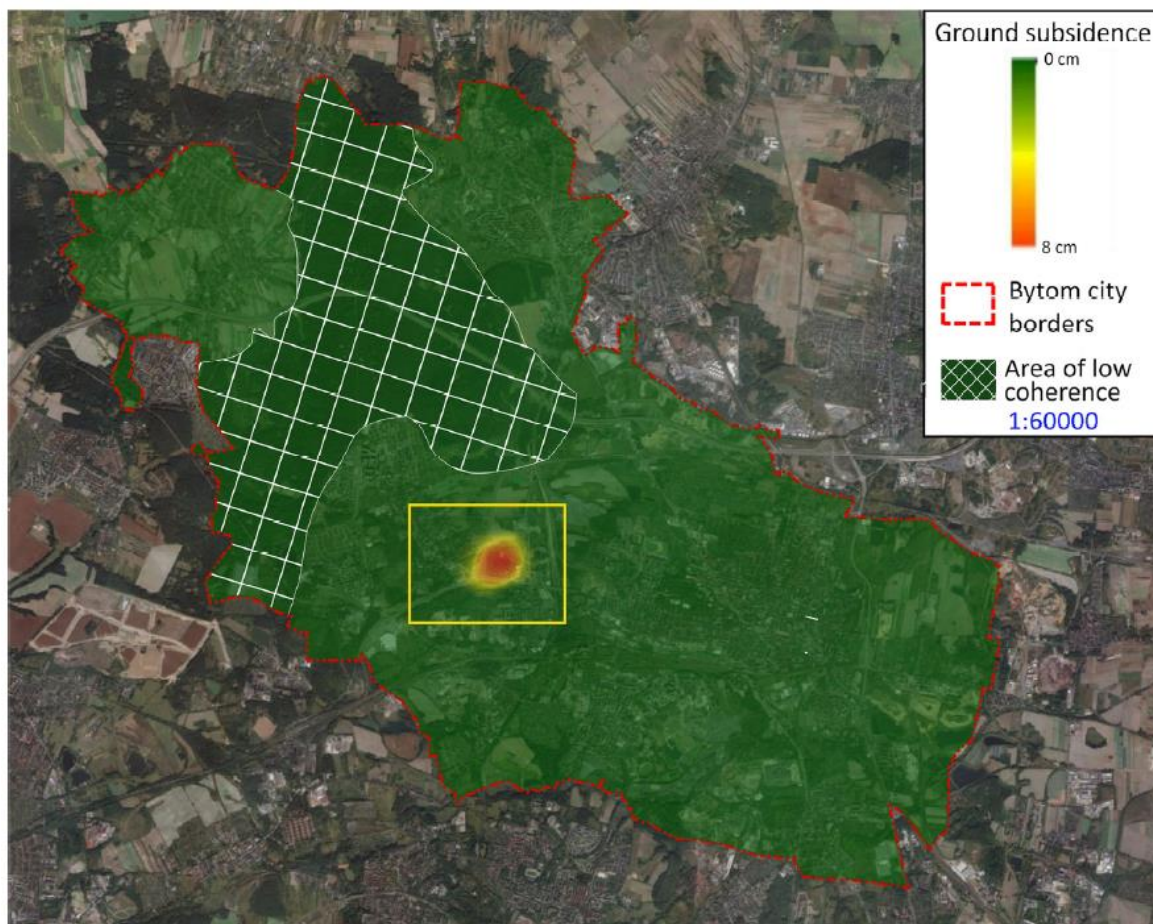
3.6.1 Kaevandamisest tekkivad pinnadeformatsioonid

Üks suurimaid väljakutseid haldamaks teede infrastruktuuri, on kahjude varajane avastamine ning seeläbi remonttööde maksumuse vähendamine. Teed, nagu ka raudteed, on väga tundlikud pinnadeformatsioonidele. Horisontaalsed pinnadeformatsioonid võivad uhtuda ära teemulded ning langetada kandevõimet, mille tulemusel laguneb ka katend. Vertikaalsed nihked viitavad veemõjudele teel. Tasub tähele panna, et ka osad hooned on seotud teede infrastruktuuriga, seetõttu võivad vertikaalsed nihked põhjustada kahju lisa surve –ja paindetugevuse või väände näol. Teede seisukorra jälgimine on oluline, mitte ainult ohutuse pärast, vaid ka remonttööde maksumuse vähendamiseks. Üheks selliseks võimaluseks ongi kaugseire tehisavaradariga.

Pinnavajumine võib olla põhjustatud looduse poolt, kuid ka hoopis mõju antropoloogilistest protsessidest. Kõige levinum inimese poolt põhjustatud vajumiste tekkimine on seotud maa-aluste kaevandustega [18].

Poola kõige intensiivsem kivisöe kaevandamine toimub Silesia põlevkivi kaevanduses. Aladel, kus kaevandustegevus on peatatud, on tähendatud endiselt pinnase vajumist. Bytomi linnas suurusega 69,5 km² viidi läbi kaevandamisest põhjustatud kahjude uurimine DinSAR analüüsi teel, kuna linna läbib regionaalse tähtsusega transpordivõrgustik, mida on kahjustanud maa-alune kaevandamine. Sentinel-1A pildid koguti vahemikus 29.11.15 kuni 23.12.15.

Uurimiseks koostati eelmainitud ajavahemikul saadud piltidest interferogramm. Analüüsi jaoks on oluline sidususe väärtus, mis peab olema üle 0.3, Bytomi linnast tehtud piltidel oli väärtuseks 0.47, mis oli sobilik. Seejärel koostati pinnaliikumiste kaart ning selgus Bytomi keskel olev vajum, mille suurus oli ligikaudu 6cm. Kaardilt on näha, et vajunud osa katab osa teedest DK94 ning DK88, samuti Rekreacja parki ning elamuid tänavate Warszawska ning Celnä vahemikus. Vajunud ala pindala on 0.95 km² [18].

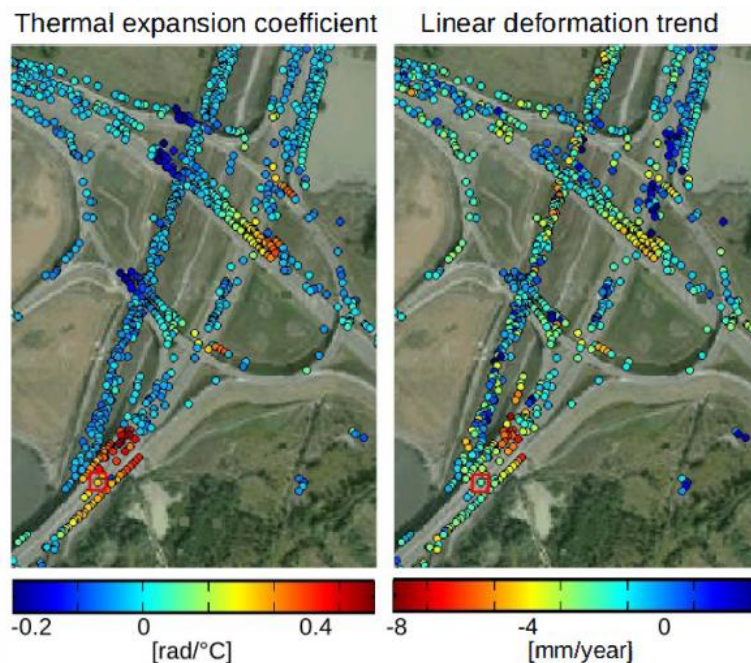


Joonis 3.7 [18] Pinnadeformatsioonide kaart 29.11.2015-23.12.2015 Bytomi linnas

DK94 all olev ala on vajunud 1200 meetri tee ulatuses, DK88 aga 1000 meetri ulatuses. Mõlemal juhul on maksimaalne vajum ulatunud viie sentimeetrini. Oluline on märkida, et avastatud vajumine toimus kõigest 24 päeva jooksul, kui Bytomi linna uuriti. Kaevandamisest põhjustatud kahjusid on täheldatud Karbi piirkonnas juba mitu aastat. Kahjustada on saanud nii kanalisatsioon, Wroclawska tänava viadukt kui ka lähedal asuv tankla. Lisaks eelnevale suleti juunis 2016 Konstytucji tänava McDonalds hoone halva seisukorra ning suurte hoolduskulude kasvu tõttu kaevandamisest tekkivatest kahjustustest. Eelneva monitoorimisega oleks saanud restoran jätta ehitamata ning teed DK94 ja DK88 oleks saanud planeerida teise kohta, vältimaks nende hävinemist hetke asukohas [18].

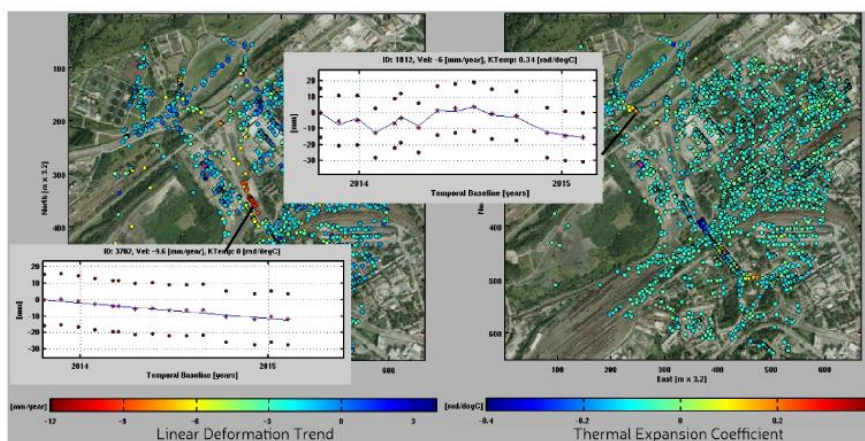
Maantee sillad Ostrava-Svinovi maanteel Tšehhis on teada oma nihete poolest pärast 2008 aastal valminud ehitust. Kaks põhilist põhjust sellele on Ostravas toimunud kaevandamisid 1990 aastateni ning madalakvaliteetse ehitusmaterjali kasutamine täitetöödel. Aastatel 2002-2011 tehtud uuringud näitasidki vajumeid, kuigi siis polnud veel võimalik eristada konstruktsioonide nihkeid seoses soojuspaisumisega [19].

Vahemikus 2013 - 2014 maanteel teostatud mõõtmiste tulemustest (geodeetilised mõõtmised, tehisavaradari pildid ning täpsed temperatuuri mõõtmiste andmed) oli võimalik eristada kõrgusemuutusi, lineaarseid deformatsioone ning soojuspaisumist [19].



Joonis 3.8 [19] Soojuspaisumise koefitsiendi ja lineaarse deformatsioon väärtused Ostrava-Svinovi ringteel 2013-2014.

2014 aasta 5. septembril tuli Ostrava linnas sulgeda kaks silla pealesõitu suurematele kui 3.5 tonniste masinatele, kuna tehisavaradari piltidelt oli näha selgeid vajumisi [20].



Joonis 3.9 [20] Vajumisest tingitud soojuspaisumise koefitsiendi ja lineaarse deformatsiooni väärtused Ostrava-Trebovice maanteel ühe aasta vältel

3.6.2 Karstilehtrite varajane avastamine teemaa-alal

Karstilehter on vees lahustuvate kivimite pinna sisse tekkinud korrapärase, koonusjas süvend, mille tekkimine võib põhjustada katastroofilise olukorra, kuna eelnevaid selgeid ohumärke ei esine. Nendest tulenev kahju võib olla nii majanduslik, eriti linnas, kui ka ehitiste kokkuvarisemist tingitud surmad.

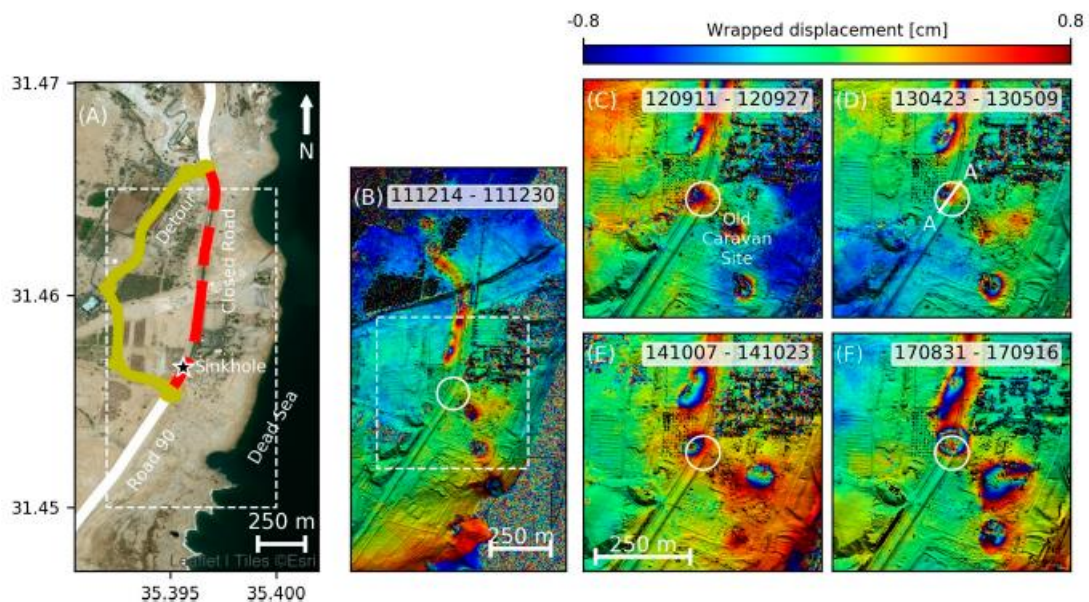
Karstilehtrite põhjustatud kahjud saab jagada järgmiselt:

- a) Otsesed kahjud, mis esinevad kohe pärast õnnetust ning õnnetuse ajal nagu surmad ning ehitiste kahjud.
- b) Kaudsed kahjud, mis on rohkem laialdasemad ning mõjutavad inimesi ning ettevõtteid õnnetuse ümbruskonnas paiknevatel aladel nagu teede sulgemine, häired kommunikatsioonides ja õnnetuses kahju saanud inimeste abistamine.
- c) Hoomamatud kahjud, mille rahalist suurusjärku on keeruline välja tuua, kuna hõlmab inimeste töөлõitmise teekonna pikkuse muutust, psühholoogilisi kahjusid ning elanike ümberpaigutamist ohualalt.

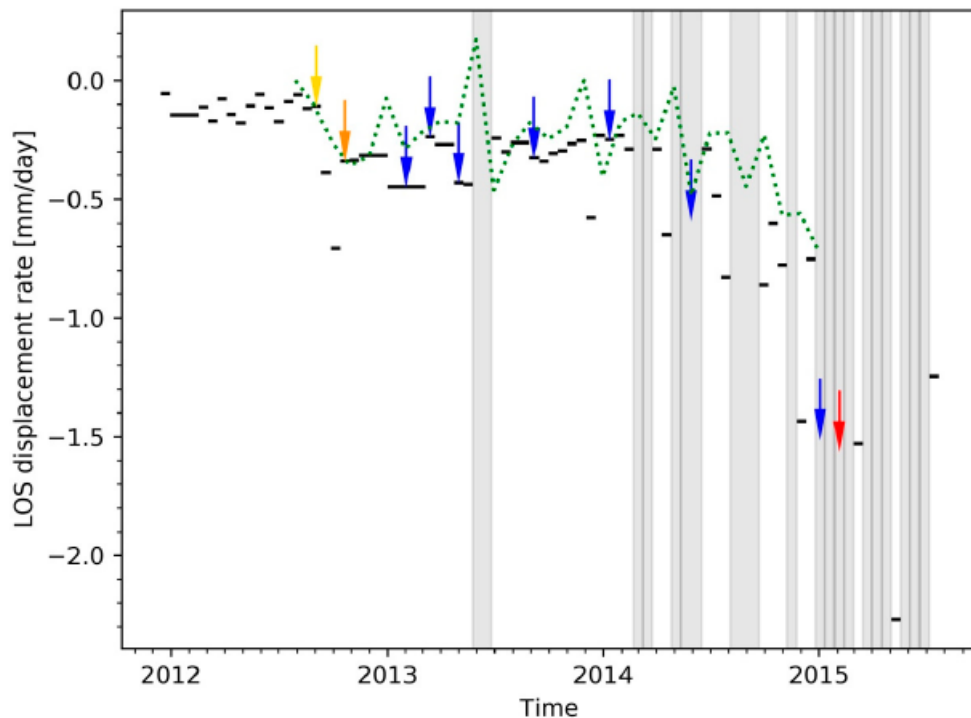
2004. aastal toimunud sellelaadses õnnetuses Floridas, Pasco County-s, maksis kindlustus välja üle 17 miljoni dollari inimestele, kes kaotasid oma kodud. Samal aastal Hispaanias Kataloonias toimunud õnnetuses olid otsesed majanduslikud kulud 4,8 miljonit eurot [21].

Viimase kolme kümnendi jooksul on Surnumere veetase langenud ligikaudu 1 meeter aastas, põhjustades tuhandeid karstilehtreid oma rannikualadel. Kaardistatud on juba üle 6000 augu alates nende esma-avastamisest 1980. aastatel.

Iisraeli tee number 90 on üks olulisemaid teid piirkonnas, kuna ühendab lõuna- ning põhjapiirkondi ning on ka ainus tee, mis viib Surnumere piirkonnast ülejäänud riiki. Alates 1990. aastatest on teed kimbutanud karstilehtrid, mille tõttu paigaldati 2002. aastal ühe meetri sügavusele teepinnast geosünteeтика. Sellest ajast kuni aastani 2012 jätkusid geosünteeতিকast allpool endiselt vajumised ning karstilehtrite teke [22].



Joonis 3.10 [22] A näitab Tee 90 asukohta En Gedi lähedal ning valge nelinurk näita ala pildil B. Interferogramm 111214-111230 (AAKKPP) ei näita vajumeid liiklussõlmes (ringi sees) tänu oma tugevale alusehitisele, valge ruut näitab asukohta piltidel C-F. Interferogrammide C-F näitavad teel asuvate vajumite algust ning arengut.



Graafik 3.8 [22] Hallid alad näitavad mittesidusate interferogrammide perioodi. Rohelised täpid näitavad kõrgusmöödistusi, mis on kohaldatud 40-kraadise nurga alt mõõdetuna. Kollane nool näitab uue vajumi tuvastamise interferogrammi. Hetke, mil anti häire kohalikule omavalitsusele ning tee omanikule, näitab oranž nool. Sinised nooled näitavad lehrtrite kokkuvarisemist teemaa-alal. Punane nool näitab hetke, mil tekkis auk otse tee alla.

Aastal 2012 hakati interferomeetrilise tehisavaradari piltide järgi ennetama aukude teket. Eesimese 9 kuu jooksul toimusid väga väiksed vajumised – 0,2mm/päevas. Pärast seda täheldati aga juba vajumeid suurusjärgus 0,4mm/päevas ning 14. oktoobril saadeti häire Rahvuslikule Transpordi Infrastruktuurile (NTIC) [22].

InSAR pildid näitasid aastal 2014 piisavalt suuri deformatsioone, mille tõttu hakkas NTIC planeerima ümbersõitu. Aasta lõpuks, kui ümbersõit oli peaaegu valmis, hakkasid olemasolevale teele tekkima juba ka praod ning 26. jaanuaril 2015 suleti tee 90 liiklusele. Sama aasta 1. veebruaril oligi teealune auk kokku varisenud, paljastades geosüntetika ning 5m laiune ja 9m sügavune auk oli nähtaval. Liiklus oli selleks ajaks uuele teele ümber suunatud. Varajane avastamine tänu tehisavaradari piltidele andis NTIC-le piisava aja planeerimaks uut tee asukohta, kus vajumeid ei tuvastatud ning vältimaks suurt õnnetust. Vajumid kestsid edasi kuni aastani 2017, mil 20 meetri kaugusel esimesest suurest lehrtrist vajus tee lõplikult kokku [22].



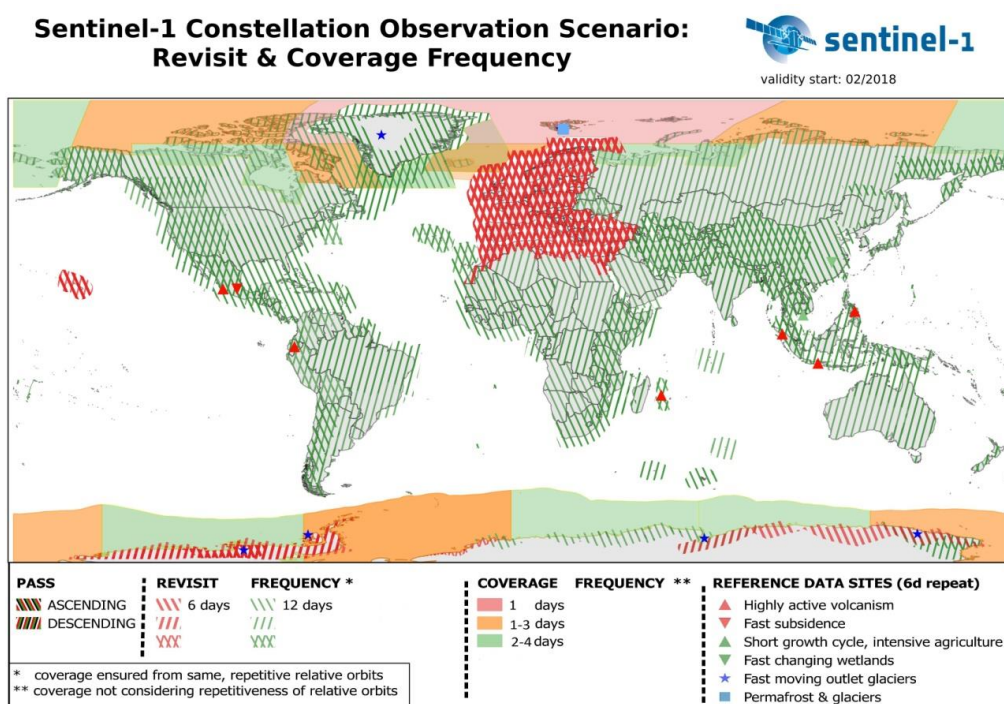
Joonis 3.11 [22] Kuupäevad on märgitud AAKKPP vaatega sulgudes olevas suunas. Aukude plaan on näha jooniselt D. Pildil A1 on lehter pärast kruusaga täitmist. B1 näitab geosüntetika nähtavale tulekut 5m laiuse ning 9m sügavuse õõnsuse peal. C1 näitab lehtri kokkuvarisemist teel pärast viite aastat InSari tuvastatud hoiatusest. D1 näitab ringikujulisi mõrasid, sinised ringid näitavad auke teemaa-alal ning punased ringid auke teel. E1 näitab survepingest tekkinud deformatsioone.

4 Satelliitkaugseire võimalused

Satelliitkaugseire on infrastruktuuri jälgimiseks kasutatav ning kättesaadav meetod suuresti tänu Copernicuse programmile, mis on Euroopa Komisjoni ja Euroopa Kosmoseagentuuri elluviidav Maa kaugseire programm. See koosneb kolmest komponendist, milleks on olemasolev ja kavandatud Euroopa kosmosetaristu, kohapealsed sensorid ning kuude põhivaldkonda jagunevad teenused, millest üks on maismaaseire. Käesolevas töös on näiteks võetud Euroopa Liidu satelliidi andmetel baseeruv varajase hoiatuse süsteem Sille, kuna see on Eestis tehtud, katsetatud ning kõigile kättesaadav.

4.1 SILLE

Sille on e-teenus, mis võimaldab kergesti jälgida infrastruktuuri vajumisi ning tõusmisi. Sille suudab tuvastada deformatsioonid, mis on suuremad kui 1mm, kuid see eeldab vähemalt aastast mõõteperioodi, saamaks vähemalt 20 mõõtepilti mõõdetava ala kohta. Tänu Euroopa Kosmoseagentuuri Copernicuse programmile loodud Sentinel - 1 on kahe-satelliidi konstellatsioon, mis tähendab kahe satelliidi –Sentinel - 1A ja Sentinel - 1B liikumist samal orbiidil 180 kraadise vahega. Kui üks satelliit läbib orbiidi 12 - päevaga, siis mõlemad koos suudavad tagada 6 - päevase kordustsükli. Võttes arvesse nende lennuplaane, saab tagada andmete katvuse ja regulaarsuse üle maailma [10].



Joonis 4.1 [10] Ülevaatus ning katvuse sageduse piirid

Analüüs suudetakse teha minimaalselt iga 12 päeva järel, kuid mõnel pool Euroopas ning Kanadas isegi iga 3 päeva tagant, mis võimaldab prioritseerida sõiduki või isikupõhist monitoorimist, vähendades seeläbi maksumust ning suurendades efektiivsust hoolduse planeerimises [10].

Mõõteperioodi saab alustada ka tagantjärele alates jaanuarist 2015, mis teeb juba hetkel olemasolevate konstruktsioonide ning pindade deformatsioonide mõõtmise kiireks ning täpseks. Sille arvestab ka temperatuurist tingitud mõjudega, kus see on oluline, näiteks metallkonstruktsioonide puhul, mis temperatuuri mõjul kahanevad või paisuvad. Selliste objektide puhul vaadeldakse deformatsioone sarnaste temperatuuride juures. Juhul kui mõõdetaval objektil puudub vajalik asukohas peegeldaja, tänu millele saab Sille kätte vajalikud andmed, on võimalik paigaldada tehispeegeldajad [10].

Siiamaani on selline teenus olnud kättesaadav vaid suurtele infrastruktuuriettevõtetele ja julgeolekuga seotud asutustele, kuid Sille võimaldab sellist teenust ka väiksematele ettevõtetele. Kuigi hetkel on huvi tuntud Sille vastu pigem välismaa riigiasutuste ning ettevõtete poolt, nagu seda on teinud näiteks USA Marylandi osariik suurobjektide jälgimiseks, Kariibi mere riik Saint Lucia analüüsimaks tervet saart, siis Eestis on huvi suhteliselt leige. Võiksime olla hoopiski tee-rajajaks, kuna kõikide Eesti taristuobjektide väga hea kaugseirevõimekuse saavutamine väikeses riigis ning kiire õigusaktide muutmise võimekus teeksid selle suhteliselt lihtsaks ning odavaks. Vajalik oleks tähtsamatesse konstruktsiooni sõlmpunktidesse projekteerida püsipeegeldajad, mis nende maksumust arvestades ei oma erilist mõju objektide kogu maksumusele, kuid mille tulemusena oleks järelevalve ning ennetustöö tõhusus väga efektiivne.

Mõõtmise hind sõltub konkreetsest objektist ning mõõdetava ala suurusest, kuid keskmiselt on 1 km² suuruse ala ühe mõõtmise hind ligikaudu 2000 eurot. Allolevalt jooniselt on näha, et kogu Eesti (pindala 70107 km²) koos merega üks kord kuus mõõtmine maksaks 355318 eurot, mis ühe aastaga moodustaks 4.26 miljonit eurot (umbes 1,2 % 2019 aasta Maanteeameti eelarvest).

See võimaldaks aga jälgida tervelt 12 korda aastas kõiki Eestis asuvaid teid, sildu ning muid taristuobjekte, saamaks varakult jälile ebanormaalsetele deformatsioonidele ning seeläbi prioritseerimaks kohapealseid vaatlusi näiteks sildade puhul.

Place a new order

CART TOTAL: 4 263 816 € + VAT
355 318 € / month

1 Add objects 2 Invoice details 3 Review order 4 Payment

ADDED OBJECTS

Eesti 355 318 € / month
58.301504900000026, 21...

ADD A NEW OBJECT

OBJECT PREVIEW

EDIT COORDINATES

OBJECT SETTINGS

Object name
Eesti

One-time or periodic analysis?
 Periodic analysis

Analysis frequency
 2 Weeks 1 Month

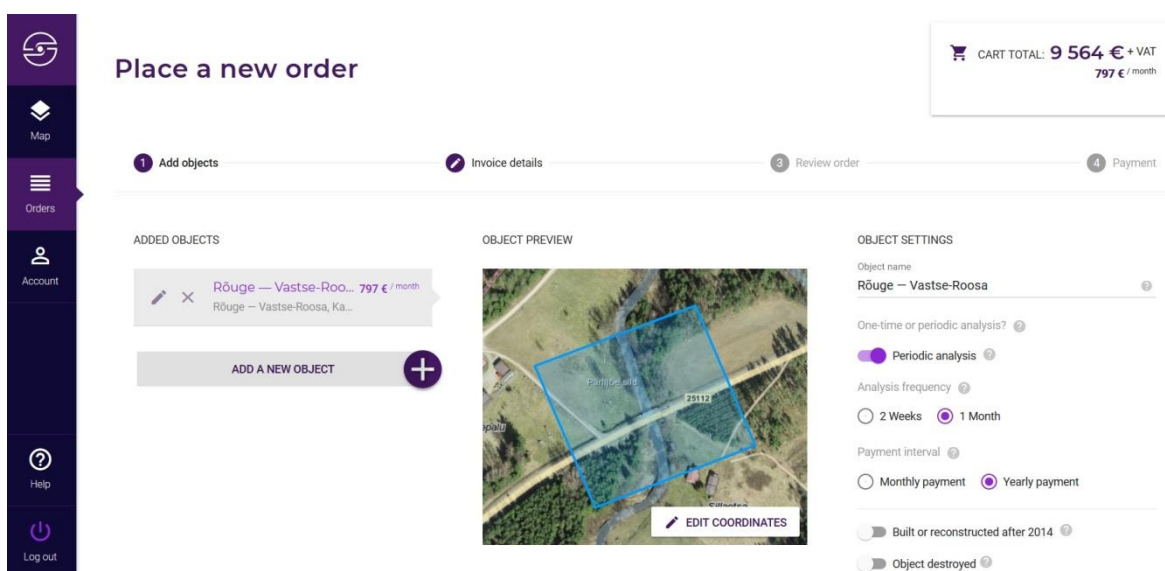
Payment interval
 Monthly payment Yearly payment

Built or reconstructed after 2014
 Object destroyed

Joonis 4.2 [10] Tellimuse esitamine Silles kogu Eesti kohta

4.2 SILLE sildade jälgimisel

Hetkel teostatud praktika põhjal võtab kõigi Eesti 1010 riigiteedel asuvate sildade (seisuga 01.01.2020) vaatlus aega 4 aastat (kohapealne vaatlus), mida korraldab Maanteeamet ning mille käigus määratakse igale sillale seisundi indeks (SI), mis kirjeldab rajatiste seisukorda, hooldusvajadust ning probleeme. Alla seisundi indeksi 70, mida loetakse halvaks, on riigiteedel 81 silda ning väga halvaks (SI<60) on 29 silda. Sillega maksaks ühe silla aastane jälgimine (12 korda aastas) ligikaudu 10000 €/sild ning siit tulenevalt kõikide väga halvast seisukorras olevate sildade jälgimine 290000 €. Tõenäoliselt oleks see summa aga isegi väiksem tänu Maanteeameti ning AS Dateli koostööle, kuna hinnad on võetud Sille kodulehelt automaatse kalkulaatori järgi.

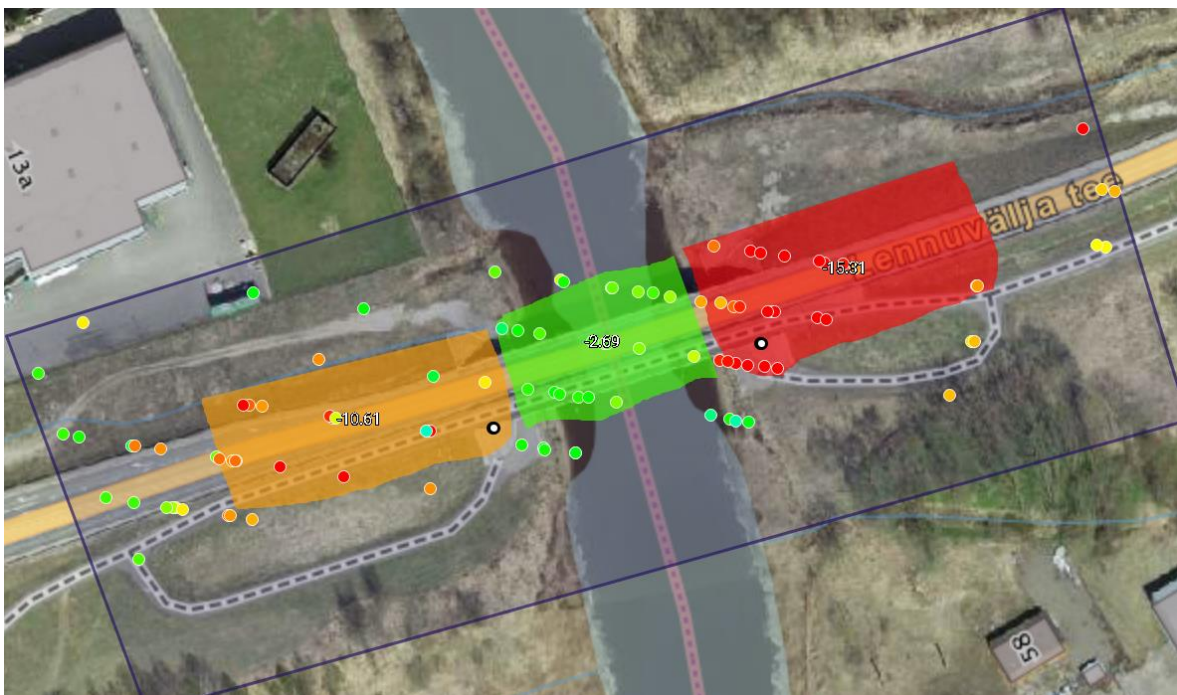


Joonis 4.3 [10] Pärlijõe sild Silles – silla SI 56,2 teeregistri andmetel

Arvestades, et praegusel ajal on statistikal põhinev silla ehitamise maksumus 2250 €/m² ning keskmine sild pindalaga 140 m², teeb see ühe silla keskmiseks hinnaks 315000 €, mis oleks silla taastamise kulu juhul, kui mõni nendest sildadest peaks kokku kukkuma, arvestamata kaudseid kulusid nagu kohalikele elanikele ning firmadele tekkivad kulud ümbersõitudest, rääkimata võimalikest hukkunutest. Lisaks materiaalsele kulule tagaks pidev kaugseire silla omanikule ja kasutajale suurema kindluse rajatise kasutamisel.

Varasema praktika põhjal on kujunenud ühe silla visuaalse ülevaatusse maksumuseks keskmiselt 150 eurot, kuid selline meetod ei näita ära silmale märkamatu deformatsioone ning andmed saadakse vaid üks kord nelja aasta jooksul. Eelpool mainitud näidete põhjal maailmast võib aga juba paari kuuline seire anda teadmise rajatise võimalikust lagunemisest. Eesti sildade keskmine vanus on 40,2 aastat ning pooled sillad ehitatud vahemikus 1950 – 1980 [23]. Tänu Sillele saaks jälgida nende võimalikke deformatsioone ning selle põhjal teha valikuid, millises järjekorras sildu remontida või rekonstrueerida.

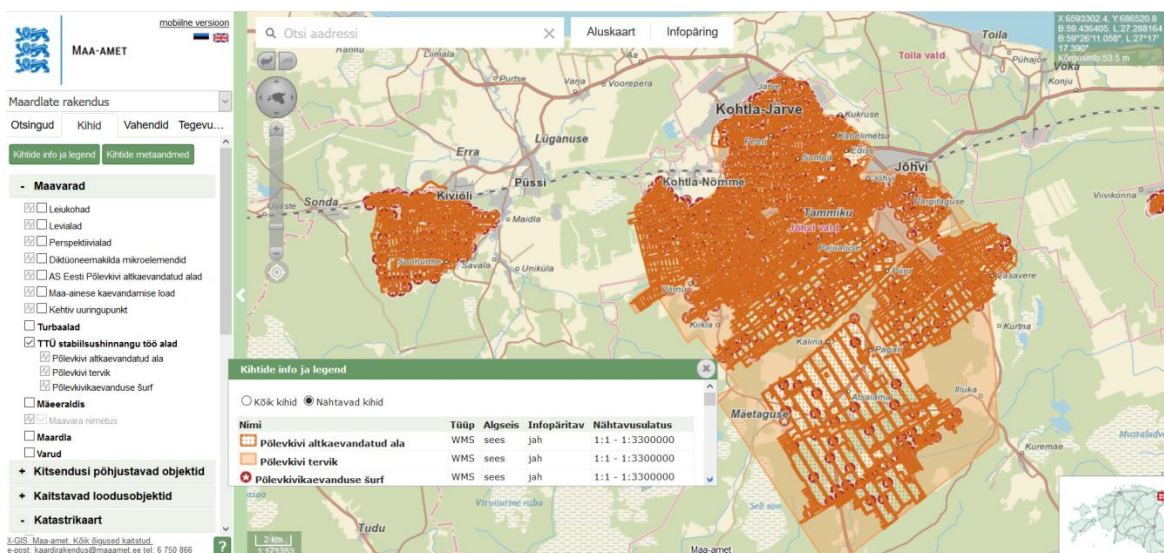
Mõõtmaks keskmisi deformatsioone spetsiifilise ala kohta objektil tänu Sille pindala mõõtevahendile, saab eraldada silla kolmeks osaks – kaheks kaldapealseks ning dekiplaadiks. See on mõistlik, kuna deformatsioonid nendel aladel on erinevad – kaldapealsed kipuvad vajuma pinnase erosiooni tõttu, samal ajal kui dekiplaat püsib stabiilsena tugevate sammaste tõttu [10].



Joonis 4.4 [10] Silla andmete vaatlemine eraldi osadena

4.3 SILLE kaevanduspiirkonna jälgimisel

Sille kasutamine Eestis tuleks kasuks ka Ida-Virumaa kaevanduspiirkonnas, kus oht pinnasevarisemiseks teede, majade ja muude ehitiste all on üsna suur nagu on selgunud ka eelnevalt mainitud Poola linna Bytomi näitel. Endiste ja ka praegu tegutsevate põlevkivikaevanduste aladel on üheks ilminguks ootamatult tekkivad varinguaugud ja langatuslohud. Maa-ameti maardlate kaardirakenduse TTÜ stabiilsushinnangu töö alade põhjal on tegemist üle 130km² avakaevandatud ning 320km² altkaevandatud suuruste aladega. Kui avakaevandamise mõju ümbritsevatele keskkonnale avaldub kohe, siis altkaevandamise mõju võib avalduda alles aastakümneid hiljem pärast kaevandamise lõppu. Sellel alal asuvad aga asustatud piirkonnad nagu näiteks Kohtla-Järve, Jõhvi ja Kiviõli.



Joonis 4.5 TTÜ stabiilsushinnangu töö alad Maa-ameti kaardirakenduses

2018 aastal teostatud Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituudi poolt tehtud uuringus on välja toodud, et paljud mõjutegurid on tekkinud aastakümneid tagasi ja ilmnevad alles nüüd langatuste ja varingutena. Varingute puhul on kõige ohtlikumad varinguaugud, mis tekivad šurfide sisselangemisel, kuna võivad olla kümnekond meetrit sügavad. Momendil teadaolevate probleemsete šurfide sisselangemise peamine põhjus on see, et nende sulgemiseks on kasutatud aastakümneid tagasi puitmaterjale, mis on nüüdseks kõdunenud.

Seega võib eeldada, et lähitulevikus võivad šurfivaringud sagedana eelkõige vanemate kaevanduste aladel. Samuti on ohtlikud kaevanduskäikude kohal olevate murenenud laekivimite sissevarisemisel tekkinud augud näiteks Edise külas Tallinn - Narva maanteest põhjas lausa mitmesaja meetri pikkusel lõigul, mis võimaldavad kõrvalistel isikutel ligipääsu maa alla, mis on äärmiselt varisemisohtlik [24].



Joonis 4.6 [24] Kaevanduskäigu varing Edisel

Uuring toob välja, et langatused võivad põhjustada hoonete ning teede vigastusi ja seeläbi vähendada kinnisvara väärtust ning seada piiranguid ehitiste rajamisele [24].

450km² ala mõõtmine traditsioonilist geodeesiat või maapealset laserskaneerimist kasutades oleks mõeldamatu, rääkimata selle korduvast teostamisest. Sille oleks siinjuures ideaalne vahend märkamaks pinnadeformatsioone, vältimaks ootamatuid varinguid elamupiirkondades ning teedel ja samuti planeerimaks uusi rajatise.

SILLA MÕODISTAMINE ERINEVATE MEETODITEGA	SILLE	Visuaalne vaatlus	Traditsiooniline geodeesia
Ühekordseks mõõtmiseks/vaatluseks kuluv aeg	1 min	20 min – 2 h	4 – 8 h
Andmete töötlemiseks kuluv aeg	0	10 min	4 – 8 h
Tööde teostamiseks vajalik inimeste arv	0	2	1
Maksumus ühekordsel mõõtmisel	800 €	150 €	240 - 480 €
Sõltub ilmast / Ei sõltu ilmast	Ei sõltu	Sõltub	Sõltub
Mõõtmiste / vaatluste intervall	2 - 4 nädalat	4 aastat	-

Tabel 4.1 Rajatise mõõdistamine erinevate meetoditega

Olemasolevate rajatiste satelliitkaugseire kasulikkus väljendub põhiliselt aja kokkuhoius ning riskide maandamises. Traditsioonilise geodeesia andmed saadakse pärast mitmeid, kui mitte kümneid tunde väli- ning sisetöid, sõltuvalt mõõdetava objekti keerukusest. Satelliitseire tulem, olenemata objektist, on käes vaid sekunditega ja kindlatel aegadel, mis traditsioonilise geodeesia puhul ei pruugi nii olla, kuna sõltub nii ilmast kui ka mõõdistaja isikuomadustest (pädevus, kohusetundlikkus, tervislik seisundist jms). Samuti ei häiri kaugseire liiklejaid, kes omakorda ei ohusta seeläbi ka mõõdistajat. Kuigi visuaalset vaatlust ära kaotada ei ole mõistlik, siis annaks tänu pidevale andmete voole deformatsioonidest neid järjestada vastavalt kui suur on oht õnnetuse tekkeks. Samuti teostada erakorralisi visuaalseid vaatlusi või katseid silmale nähtamatu ohu ilmnemisel. Kaevanduspiirakonna näitel on võimalik tänu satelliitkaugseirele pidevalt jälgida suurte maa-alade vajumeid, mis muidu on sellises mahus võimatu.

Eelpool väljatoodud väga halvas seisus pidev sildade jälgimise maksumus satelliitkaugseirega 290 000€ on üsna väike summa, arvestades sildade arvu ning riske, mida see maandab. Kuigi sama raha eest saaks rekonstrueerida mõne nendest sildadest, siis võib iga hetk tekkida olukord, kus ükskõik milline nende seast kasutuskõlbmatuks muutub. Pidev satelliitseire aitaks sellist olukorda ennetada andes aega planeerida järgnevaid samme. Võttes kasutusele täistõenäosusel põhineva hindamise mudelid konservatiivsemate meetodite asemel, oleks võimalik süsteemi või protsessi ajas modelleerida, mis teeks prognoosimise täpsemaks ning reaalajas kasutatavamaks.

Seisundi muutused ajas annavad sillapargi kohta oluliselt rohkem informatsiooni, kuna siia on lisatud ka ajaline faktor. Jättes välja kohalike elanike rahulolematuse, võib ootamatu silla kinnipanek tekitada ümberkaudsetele ettevõtjatele olukorra, kus oma äri jätkamine muutub kallimaks või kohati isegi ajutiselt võimatuks, sõltuvalt sellest, kas ümbersõidu võimalused on olemas ning kui suurte masinatega on vajadus liigelda. Tulemuseks on maksulaekumiste vähenemine, mis on otsene rahaline kaotus.

4.4 Otsused ja soovitused

Antud töö põhjal on kujundatud mõningad otsused ja soovitused, mis aitaksid arendada edasi satelliitkaugseire kasutamist infrastruktuuri seisundi jälgimisel. Kaugemas tulevikus võiks sellest kujuneda välja Eestile omane meetoodika, mis oleks sildade jälgimisel eeskujuks ka teistele riikidele. Järgnevalt on välja toodud otsused ja soovitused satelliitkaugseire kasutamiseks Eestis:

- Vajalik on teostada praktilisi katseid Eesti sildadel, kujundamaks välja süsteem kaugseire andmete ning visuaalsete vaatluste kombinatsioonist, tänu millele saaks täpsema ja järjepideva ülevaate seisundi indeksi väärtuse langusest.
- Alustada võiks sildadest, mille $SI < 60$, mis on kasutajale kõige ohtlikumad.
- Seisundi muutused ajas annavad rohkem informatsiooni sillapargi kohta kui tavaline keskmine, mille tõttu peaks kasutusele võtma kindla prognoosimudeli, mille puhul oleks võimalik süsteemi/protsessi ajas täpsemalt modelleerida, vähendamaks rajatise tööhoidmiseks vajalikke kulusid.
- Pidev satelliitkaugseire aitab ennetada ootamatuid õnnetusi rajatistega nagu uhtumisi või vajumisi, seeläbi suureneks turvatunne rajatise kasutamisel.
- Uutele rajatistele võiks paigaldada püsipeegeldajad konstruktsioonilistesse sõlmpunktidesse, tänu millele oleks kaugseire tõhusam.
- Satelliitkaugseire infrastruktuuri seisundi jälgimisel muutub aastatega ühe kasutatavamaks seisundi jälgimise vahendiks maailmas ning Eesti ei tohiks selles osas teistest maha jääda, vaid peaks hoopis ise teed rajama arendamiseks teenust just enda vajadustest lähtuvalt.
- Lisaks sildadele võiks jälgida ka Ida-Virumaa vanu kaevanduspiirkondi, kus esineb üha rohkem uusi varinguid.

Kokkuvõte

Käesoleva töös selgitatakse lahti võimalus kasutada satelliitkaugseiret infrastruktuuri, põhiliselt sildade, seisundi jälgimiseks. Hetkel kasutatav praktika sildade seirel annab uut infot iga nelja aasta järel, mis on üsna pikk aeg oluliste muutuste toimumiseks. Pidev seisundi jälgimine ning reaalajas teave rajatiste ning ümbritseva keskkonna seisundi muutumisest, annab võimaluse täpsemini ning väiksemate kuludega planeerida ning teostada hooldusi ning remonttöid.

Hetkel puuduvad selged ning heaks kiidetud prognoosimudelid teedevõrgu kohta, lähtutakse kõige lihtsamatest mudelitest ning keskmistest hindadest. Uute mudelite kasutusele võtmise puhul muutuks süsteemi või protsessi ajas jälgimine dünaamiliseks, mis teeb prognoosimise täpsemaks ning reaalajas kasutatavamaks. Sellest tulenevalt saab optimeerida informatsiooni väärtust seisundi jälgimise süsteemis. Isegi paarikuuline järjepidev satelliitseire võib anda teadmise rajatise võimalikust lagunemisest. Eesti sildade keskmine vanus on 40,2 aastat ning pooled sillad ehitatud vahemikus 1950 - 1980, mille tõttu on vajalik remonttööde teostamine. Rohkemate andmete olemasolul on lihtsam ning odavam prioritseerida rajatiste remonttöid, vältimaks hilisemaid suuri kulutusi õnnetuste tagajärgede likvideerimiseks. Samuti väheneksid kaudsed kulud, mis tekivad rajatise sulgemisest läbi kohaliku piirkonna elanike. Sellest lähtuvalt on kasulik, kui uutele objektidele paigaldatakse juba ehituse ajal külge püsipeegeldajaid, mis võimaldavad täpsemalt rajatise satelliitseirega jälgida ning anda tema omanikule märku võimalikust ohust.

Tänu e-teenusele Sille on satelliitkaugseire meile kättesaadavam kui kunagi varem. Maanteeameti ning IT-firma Dateli koostööle tuginedes on võimalik sildade vaatlused kombineerida järjepideva kaugseirega, saamaks ohtudest teada enne nende toimumist. Selline pidev rajatiste seisundi jälgimine riigitasemel oleks maailmas ainulaadne ning eeskujuks teistele riikidele.

Summary

The current thesis clarifies if it is possible to use satellite remote sensing for monitoring the condition of infrastructure, foremostly bridges. The current practice of monitoring bridges, gives new information every four years, which is quite a long time for important changes to take place. A constant monitoring and real time information on the changes to the structures and surrounding environment, provides the opportunity to more accurately and economically plan, as well as perform, maintenance and repair works.

Currently there is a lack of a clear and approved forecast model about the road network, it is being approached from the simplest of models and average costs. The use of new models, would make the following of the system or process, in time more dynamic, which would make forecasting more precise and useable in real time. The resulting consequence is that the value of information, can be optimised in the system of monitoring the condition. A constant surveillance by satellite, of a couple of months, may even give knowledge about the possible destruction of the structure. The average age of Estonian bridges is 40.2 years and half of the bridges have been built in the period 1950 - 1980, because of which, it is necessary to perform repair works. It is easier and more economical to prioritise the repair works of structures, with the existence of more data, to later avoid large expenditures for the liquidation of accidents. The indirect costs would also decrease, which are created by the closure of the structure, through the local area inhabitants. It is useful, based on this that for new objects, already at the time of construction, they would be equipped with permanent reflectors that would allow for more precise satellite surveillance, of the structures and warn the owner, of possible dangers.

Satellite remote sensing has become more accessible than ever before, thanks to the e-service Sille. It is possible by relying on the cooperation between the Road Administration and the IT company, Datel, to combine the observation of bridges with constant remote sensing, becoming aware of dangers prior to their occurrence. Such a constant observation of the condition of structures, on a state level would be unique in the world and an example for other countries.

5 Kasutatud kirjandus

1. EVS-EN 1990:2002, Eurokoodeks: Ehituskonstruksioonide projekteerimise alused
2. ES ISO 2394:2012
3. SAMCO Final Report F08a Guideline for the Assessment of Existing Structures (2006)
4. V. Pakrashi, H. Wenzel, J. Matos, J. Casas, A. Strauss, I. Stipanovic, R. Hajdin, A. Kedar, G. Guðmundsson, M.P. Limongelli, Y. Xenidis, S. Skaric Palic, WG5 Technical report drafting of guideline / recommendations of cost action TU 1406 (2019)
5. I. Stipanovic, E. Chatzi, M. Limongelli, K. Gavin, Z. Allah Bukhsh, S. Skaric Palic, Y. Xenidis, B. Imam, A. Anzlin, M. Zanini, G. Klanker, N. Hoj, N. Ademovic, WG2 Technical Report – Performance Goals for Roadway Bridges of cost action TU 1406 (2017)
6. E. Seneta, Markov and the Birth of Chain Dependence Theory (1996)
7. E. Chatzi, K. G. Papakonstantinou, R. Hajdin, D. Straub, Observation-based Decision-making for Infrastructure (2017)
8. I. Traat, N. Lepik (Tartu Ülikool), Bayesi statistika Markovi ahelatega (2013)
9. J. An, R. T. Haftka, N. H. Kim, Fuh-Gwo Yuan and B. M. Kwak, Bayesian Approach for Structural Health Monitoring –Application to Migration Technique
10. <https://sille.space/en/> (15.03.2020)
11. J. G. Robles, M. Black, B. S. Gomar, Correlation study between in-situ auscultation and satellite interferometry for the assessment of nonlinear ground motion on Crossrail London (2016)
12. G. Yao, C.Q. Ke, J. Zhang, Y. Lu, J. Zhao, H. Lee, Surface deformation monitoring of Shanghai based on ENVISAT ASAR and Sentinel-1A data (2019)

13. J. J. Sousa, I. Hlaváčová, M. Bakoň, M. Lazecký, G. Patrício, P. Guimarães, A. M. Ruiz, L. Bastos, A. Sousa, R. Bento, Potential of Multi-temporal InSAR Techniques for Bridges and Dams Monitoring (2014)
14. Report 10A, Value of data, Analysis of data from various surveying methods. Part of R&D project "Infrastructure in 3D" in cooperation between Innovation Norge, Trafikverket and TerraTec (2017)
15. Canada's Core Public Infrastructure Survey: Roads, bridges and tunnels (2016)
16. D. Cusson, K. Trischuk, D. Hebert, G. Hewus, M. Gara, P. Ghuman, Satellite-Based Monitoring of a Highway Bridge in Canada - Challenges, Solutions and Value (2017)
17. S. Selvakumaran, S. Plank, C. Geiß, C. Rossi, C. Middleton, Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques (2018)
18. R. Murdzek, H. Malik and A. Leśniak, The use of the DInSAR method in the monitoring of road damage caused by mining activities (2018)
19. M. Lazecky, D. Perissin, M. Bakon, J. M. Sousa, I. Hlavacova, N. Real, Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations (2015)
20. M. Lazecky, M. Bakon, J.J. Sousa, D. Perissin, I. Hlavacova, G. Patricio, J. Papco, P. Rapant, N. Real, Potential of multi-temporal InSAR techniques for structural health monitoring (2015)
21. E. Intrieri, G. Gigli, M. Nocentini, L. Lombardi, F. Mugnai, F. Fidolini, N. Casagli, Sinkhole monitoring and early warning: An experimental and successful GB-InSAR application (2015)
22. R. N. Nof, M. Abelson, E. Raz, Y. Magen, S. Atzori, S. Salvi 4 and G. Baer, SAR Interferometry for Sinkhole Early Warning and Susceptibility Assessment along the Dead Sea, Israel (2019)
23. <https://www.mnt.ee/et/tee/eesti-teedevork/sillad-riigiteedel> (15.03.2020)
24. Tallinna Tehnikaülikool geoloogia instituut, Põlevkivi altkaevandatud alade varingute uuring (2018)