

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogia teaduskond
Ökoloogia ja Maateaduse instituut
Geoloogia osakond

Margit Miller

Maapinna vertikaalliikumise iseloom Pärnu linnas perioodil
1987 – 2010 põhjavee survetaseme muutuste taustal

Magistritöö keskkonnatehnoloogias

Juhendaja: Marko Kohv

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja.....

Kaitsmisele lubatud

Osakonna juhataja.....

Tartu 2013

Sisukord

Sissejuhatus.....	3
1. Maapinna vajumise probleemi teoreetiline taust.....	4
1.1 Vajumiste mõõtmine.....	7
1.2 Näiteid mujalt maailmast maapinna vajumise kohta.....	7
1.3 Maapinna vajumistest Eestis.....	10
2. Uringuala ülevaade.....	12
2.1 Geoloogiline ehitus.....	12
2.2 Põhjavee taseme pikaajalised muutused.....	14
2.3 Maapinna vajumine perioodil 1960.–1988. a.....	15
3. Materjalid ja metoodika.....	17
4. Tulemused.....	21
4.1 Süvareeperite kontrolli tulemustest.....	21
4.2 Linnas hajusalt paiknevate reeperite kumulatiivne liikumine.....	21
4.3 Klasteranalüüs.....	22
4.4 Pärnu jõe mõju tema kallastel asuvate reeprite liikumisele.....	24
4.5 Satelliitseire andmete ja reeperite liikumise võrdlus.....	25
4.6 Maapinna liikumiste visualiseering.....	27
4.7 Maapinna liikumiste seos põhjavee survetaseme tõusu ja savikihi paksusega.....	29
5. Arutelu	30
Kokkuvõte ja järeldused.....	34
Tänuõnad.....	35
Kasutatud kirjandus.....	36
Summary.....	39
Lihtritsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	41

Sissejuhatus

Looduslikke protsesse, mis võivad kaasa tuua ohu inimese varale, elule või põhjustada äkilisi suuri keskkonnamuutusi, nimetatakse loodusohudeks (inglise keeles “natural hazards“). Siia hulka kuuluvad nii atmosfäärinähtused (tormid, kuumalaine jne), hüdroloogilised sündmused (üleujutused, põud), kosmogeensed (päikesetormid, meteoriidi tabamus) ja ka geoloogilised protsessid nagu maavärinad, tsunamid, vulkaanipursked, maalihked, maapinna vajumine jne. (Keller & DeVecchio, 2012)

Eesti kohta autorile teadaolevalt otsesest analüüsi ei ole tehtud, kuid arvatavasti on meie suurimad loodusohud ilmaga seotud: suvised trombid, kevadised jõgede-järvede üleujutused, sügisesed tulvaveed ja sügistorvid, millega võib kaasneda ulatuslik rannikuala üleujutamine (Eesti ilma riskid, 2008).

Geoloogilistest ohtudest on Eestis teada maalihked, vajumised ning karstinähtused (Vilo, 1986). Eesti oludes võib geoloogilise ohuna nimetada ka tervist kahjustava lõhnatu ja värvitu gaasi radooni emissiooni pinnasest elamute siseõhku. Radoon tekib uraani lagunemisel ning Eestis, eriti õhukese pinnakattega põhjarannikul, on radoonioht suurim kogu Euroopas, kuna siinses geoloogilises läbilõikes esineb kõrge uraanisisaldusega graptoliitargilliiti ja fosforiiti ning pinnakate sisaldab nende purdu ja peeneseid. (Jüriado et al., 2011)

Maapinna vajumise ehk vertikaalsuunalise alanemise põhjused võivad olla looduslikud või inimtekkelised nagu näiteks põhjavee ulatusliku tarbimisega kaasnev põhjavee taseme alanemine ja ehitiste rajamise näol pinnase koormamine, samuti võivad vajumised toimuda nimetatud põhjuste koosmõjul. Suurem osa vajumisi maailmas on tekkinud kivimite keemilise murenemise ehk karstumise tõttu. Lisaks on vajumisi põhjustanud põhjaveetaseme alanemine, igikeltsa sulamine, deltaalade setete tihenemine ja rannikualadel märgalade hävimine. Samuti võib maapinna vajumine olla maavärinate, vulkaanilise tegevuse, vedelate maavarade ammutamise ning allmaakaevandamise ja -ehitamise kaasmõju või tagajärg. (Keller & DeVecchio, 2012; Strozzi et al., 2009)

Linnaaladel võib maapinna vajumine olla tõsiseks probleemiks, tekitades kahjustusi ehitiste konstruktsioonidele ning muuta ebahühtlaseks maantee- ja tänavakatete pinna ning kaasa tuua märkimisväärseid kulutusi renoveerimistöodele. Näiteks Soomes Turu linnas maapinna

vajumise tõttu kahjustunud Pearaamatukogu vaivundamendi uuendamise ligikaudne maksumus oli 90 miljonit eurot (Karila et al., 2005). Samuti nõuab nõrgale ja vajuvale pinnasele ehitamine juba eelnevalt lisakulutusi (Vilo, 1986). Hoonete ja ehitiste vajumise puhul on problemaatiline eelkõige olukord, kus objekti eri osade vajumise kiirus ja ulatus on erinev (Vilo, 1976).

Ka Eestis on maapinna vajumine olnud probleemiks mitmes linnas: Tallinnas, Tartus, Pärnus, Haapsalus ja mujalgi on toimunud erineva ulatusega maapinna vajumisi, mille põhjusteks on olnud põhjaveetaseme alanemine, jääajajärgsete nõrkade savipinnaste tihenemine või ürgorgude orgaanilise materjali kokkusurutavus ning lagunemine (Vilo, 1986). Lisaks on toimunud maapinna vajumisi põlevkivi allmaakaevanduste alal Kirde-Eestis (Toomik, 1999).

Pärnu linnas on survealuse põhjavee tase viimase 50 aasta jooksul teinud läbi suured muutused. 1960. aastatest alates suurenes põhjavee tarbimine ja algas põhjavee survealuse langus, mis saavutas miinimumi linna piires 1986.-1989. a. Peale seda on põhjavee survealuse kiirelt tõusnud ja alates 2001.-2003. a on veetaseme püsinud stabiilne, toimunud on üksnes sesoonsed kõikumised ulatusega kuni 1,5 meetrit (Kohv, 2011).

Tulenevalt eeltoodust on käesoleva töö eesmärkideks:

- Kirjeldada ja analüüsida Pärnu linnas maapinna vertikaalliikumisi perioodil 1988.-2010. a ning võrrelda maapinna liikumise iseloomu varasema perioodiga;
- Selgitada maapinna liikumise iseloomu põhjuseid arvestades uuringualaks oleva Pärnu linna geoloogilises ehituses muutuva savikompleksi põhjavee survealuse pikaajaliste muutustega linna piires;
- Uuendusliku aspektina katsetada Eestis satelliitseire (InSar) mõõtmisandmestiku kasutamist Pärnu linnas maapinna üldliikumiste iseloomustamiseks (perioodil 1992.-2000. aasta).

1. Maapinna vajumise probleemi teoreetiline taust

Käesoleva töö sisuks on kirjeldada ja analüüsida põhjavee survetaseme languse ja tõusuga seotud maapinna liikumise iseloomu. Üldiselt peavad maapinna vajumise tekkimiseks olema täidetud järgmised tingimused: pinnase skeletile peab mõjuma lisapinge ning pinnas peab olema kokkusurutav. Kokkusurutavad pinnased on reeglina suure poorsusega pehmed savi- ja möllpinnased, orgaanikasisaldusega pinnased ja kohevad liivad. Lisapingete tõttu suureneb pinnasele mõjuv efektiivne vertikaalne normaalpinge, mille tulemusena paigutuvad pinnaseosakesed vähenenud pooriruumi arvelt tihedamalt kokku, mis väljendub maapinnal vajumina. Lisapingete tekitajateks võivad olla ehitised, täitepinnas, lasuv pinnas või poorirõhu (põhjavee taseme) alanemine. Vajumised võivad toimuda ka nimetatud põhjuste koosmõjul. Maapinnale paigutatud ehitisest ja täitepinnasest lähtuv lisapinge on kergesti mõistetav, kuid põhjaveetaseme alanemisest põhjustatud vajumine on raskemini hoomatav. Mehhanism seisneb selles, et põhjavee taseme alanedes väheneb pinnases ka poorirõhk u ja seega kasvab efektiivpinge σ_z ehk teisisõnu, suurem osa pingest langeb pinnase skeletile (Tabel 1). (Coduto, 1998; Vilo, 1986)

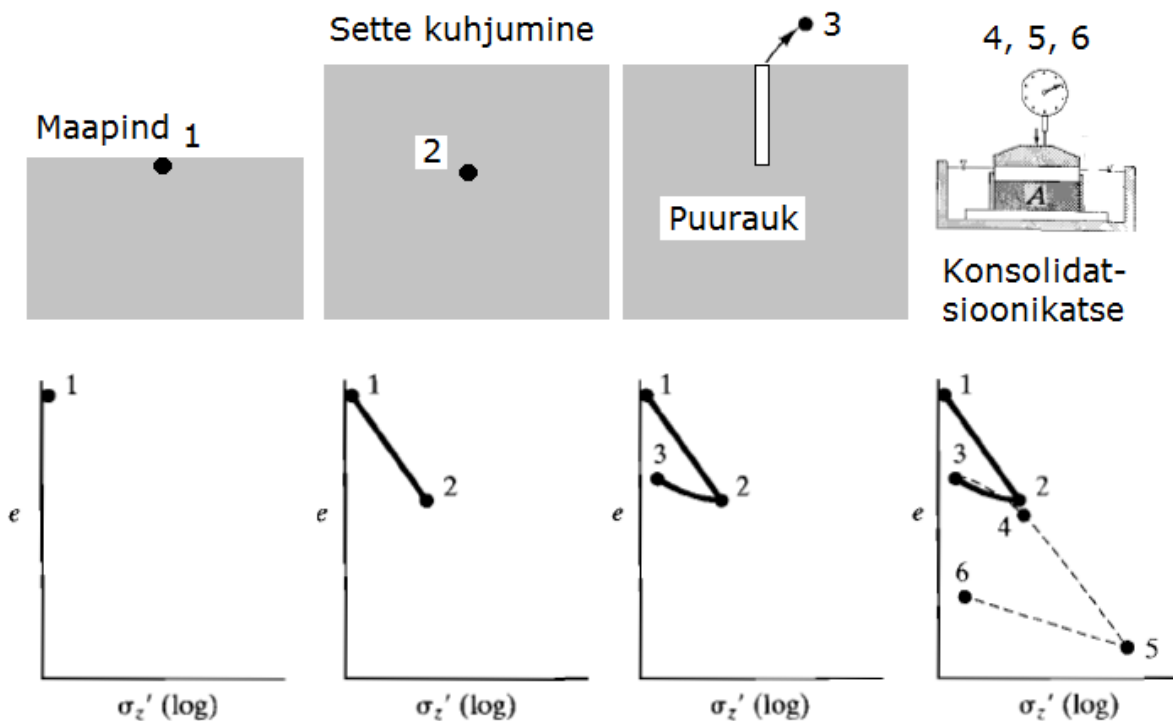
Valem pooriveerõhu arvutamiseks: $u = y_w \times z_w$
u – pooriveerõhk (ühik kN/m^2)
y_w – vee mahukaal ($9,8 \text{ kN/m}^3$)
z_w – kaugus punkti ja põhjaveetaseme vahel (ühik m)
σ'_z – efektiivne vertikaalne normaalpinge
$\sigma'_z = \sigma_z - u$
σ_z – efektiivpinge (pinge, mis mõjub pinnase skeletile) (ühik mõlemal kN/m^2)

Tabel 1. Valemid pooriveerõhu u ja efektiivse vertikaalse normaalpinge σ'_z arvutamiseks (Coduto, 1998).

Vajumi ulatuse ja ajalise kestuse kujunemisel on määrava tähtsusega omadus pinnase pingeseisundi ajalugu näitav eelkonsolidatsioonipinge (eeltihenemissurve). See näitab maksimaalset pinget, mis konkreetsele pinnasepunktile geoloogilise aja jooksul kunagi mõjunud on. Normaaltihenunud pinnaste puhul on praegusel hetkel mõjuv pinge ühtlasi ka suurim, mis kunagi mõjunud. Ületihenunud pinnase puhul on mingil perioodil mõjunud

suuremad pinged, kuid need on praeguseks vähenenud – näiteks on osa setteid pealt ära erodeeritud. Eeltihenemissurve tähtsus seisneb selles, et kui pinnasele mõjuv pinge ületab eelkonsolidatsiooni pinge, algab intensiivne konsolidatsioon. Lisaks elastsele deformatsioonile hakkab pinnases toimuma ka plastne deformatsioon, mille ulatus on oluliselt suurem. (Coduto, 1998)

Tavaliselt on enamik pinnaseid kas normaal- või ületihenunud seisundis ning ka Pärnus oli savipinnaste kompleks varem ületihenunud seisundis. Seoses intensiivse veetarbimise ja põhjaveetaseme langusega alates 1960. aastatest suurenesid savikihis efektiivsed vertikaalpinged ja saavutasid savikihi keskosas võrdse väärtuse eeltihenemissurvega. Veetaseme langusega tekkinud depressioonilehtrite piirkonnas muutus ületihenunud savikompleksi keskosa normaal- või alatihenenuks, savikompleksi ülemise ja alumise piiri läheduses säilis üldjuhul ületihenunud olek. Pinnaseomadused muutuvad pärast eeltihenemispinge ületamist ning kokkusurutavus suureneb. Sellega on seletatav Pärnu alal maapinna vajumiste kiiruse ja ulatuse kasv alates 1960. aastate keskpaigast. (Listra & Talviste, 1988¹; Liblik et al., 1989)



Joonis 1. Pinnase deformatsioon efektiivse vertikaalpinge suurenemise ja sellele järgneva vähenemise järel ning konsolidatsioonikatse käigus (Coduto, 1998 järgi koostanud A. Sedman). σ'_z - efektiivne vertikaalne normaalpinge, e – poorsustegur.

Joonisel 1 on toodud pinnase konsolidatsioonilise vajumise etapid konsolidatsioonikatse käigus, millega saab määrata pinnase kokkusurutavust iseloomustavaid näitajaid. Punktis 2 on toimunud lisakoormuse asetamine, misjärel on kasvanud efektiivne vertikaalne normaalpinge ja on toimunud pinnase kokkusurumine pooriruumi arvelt. Punkt 3 iseloomustab pinnase käitumist pinge kadumisel, proov lasundist eemaldatakse – toimub pinnase elastne deformatsioon ehk paisumine. Nõrkade savipinnaste puhul moodustab elastne deformatsioon alla 10 % üldisest deformatsioonist (Vilo, 1986; Listra & Talviste, 1988²). Punkt 3 iseloomustab näitlikult pinnase ületihenened olekut, s.t. et minevikus (eelmises etapis) on mõjunud pinnasele suurem pinge. Punkt 4 näitab pinnase käitumist konsolidatsioonikatse käigus pinnase uuesti koormamise järel konsolidatsioonikatse käigus, punktide 3 ja 4 vaheline kõver iseloomustab elastset deformatsiooni. Kõver punktide 4 ja 5 vahel näitab uut plastset deformatsiooni, mis esineb juhul, kui pinnasele mõjub suurem efektiivne vertikaalne normaalpinge kui kunagi varem. Kui proovikeha koormamine lõpeb, siis toimub joonise järgi punktide 5 ja 6 vahel elastne deformatsioon (täielikult plastne deformatsioon tähendaks pinnase koormusaegse deformatsiooni säilimist ka koormuse kadumisel). (Coduto, 1998)

Maapinna vajumist saab iseloomustada erinevate faasidega ning esmane ja ulatuselt suurim on konsolidatsiooniline vajumine. Mõningates pinnastes võib vajumine jätkuda teises faasis ehk sekundaarse konsolidatsioonilise vajumise tõttu, mis toimub pinnaseosakeste roome, ümberpaigutumise või orgaanilise aine lagunemise tõttu. Selline vajumine toimub üliplastilistel savidel, orgaanilistes pinnastes, aga ka näiteks prügis, muudes pinnastes võib selle lugeda olematuks. Kolmas faas on vajumine külgsuunalise deformatsiooni tõttu, mis võib toimuda näiteks väga suure kaaluga ehitise paigutamisel väikesele pindalale. Summaarne maapinna vajumine on kõigis kolmes faasis toimunud vajumite summa, üldjuhul on vajumid aga eelkõige põhjustatud konsolidatsioonilisest vajumisest. (Coduto, 1998)

1.1 Vajumiste mõõtmine

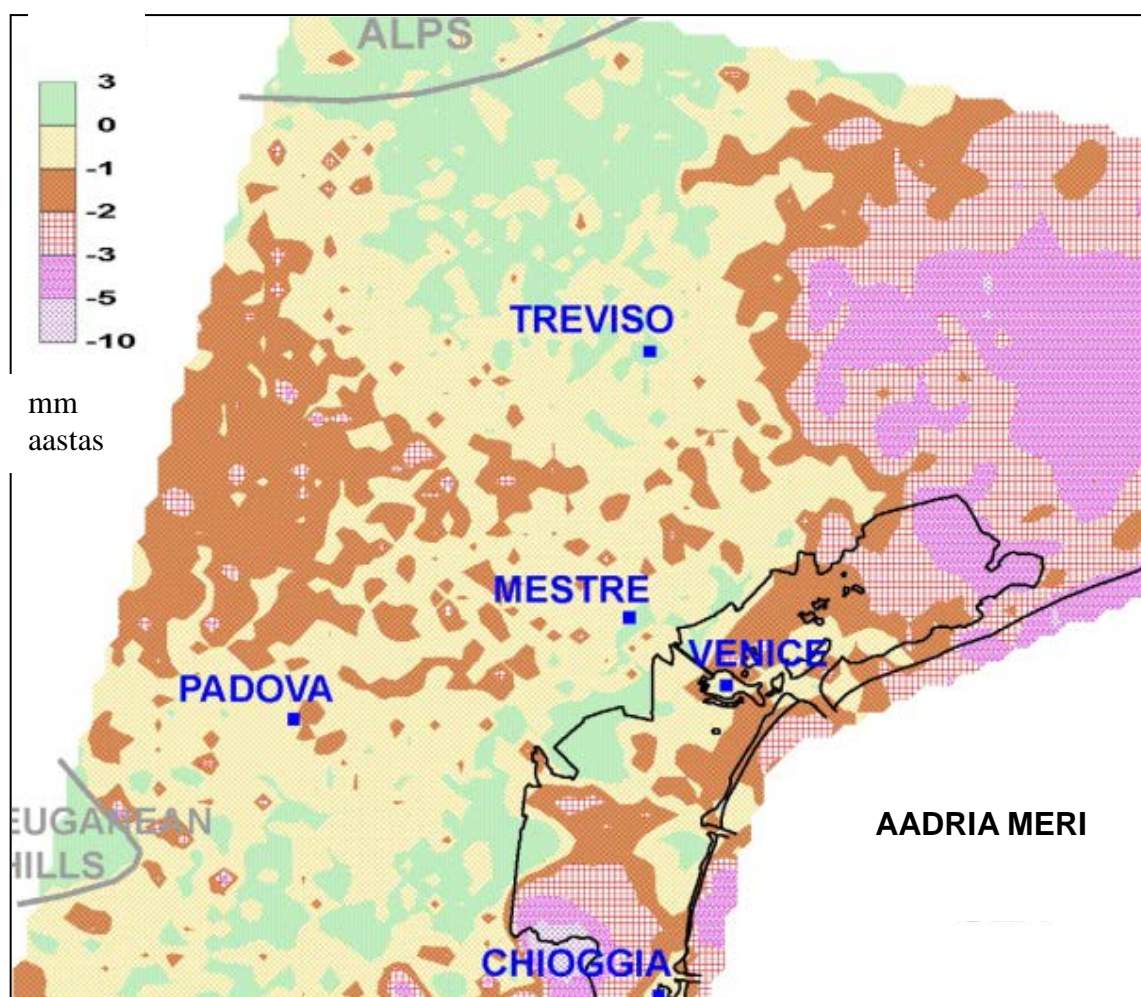
Maapinna liikumiste jälgimiseks on tänapäeval erinevaid võimalusi. Geodeetilistest meetoditest on levinumad geodeetiline kordusmõõdistamine ehk kordusnivelleerimine ja GPS (lühend ingl keelsest nimetusest *Global Positioning System*) püsijaamade võrgu kasutamine. Püsijaamade võrk on aga väga hõre (Eestis on hetkel 9 jaama (Oja et al., 2012)) ning aegread (siiani) veel üsna lühikesed. GPS püsijaamade eeliseks on väga suur täpsus, globaalne katvus ning andmete võrreldavus.

Nivelleerimiseks ehk kõrguslikuks mõõdistamiseks nimetatakse selliseid mõõtmisi, mille järgi määratakse maapinna punktide omavahelisi kõrguslikke erinevusi ehk kõrguskasve ning kõrguskasvude järgi arvutatakse samade punktide kõrgused (Ellmann & Oja, 2008). Geodeetiliste mõõtmispunktide võrk on üldjuhul üsna hõre ja lokaalne ning mõõtepunktid võivad saada aja jooksul kahjustada või hävida, samuti on mõõdistamise aja- ja tööjõu kulu üsna suur (Hongdong et al., 2011). Eelistena saab nimetada võrdluspunktide püsivust ja et saadud mõõtmistulemused on suure täpsusega, aegread ulatuvad mõningal juhul üle 50 aasta ning üldjuhul on andmetöötluse maht mõõdukas. Riikide vahel on aga andmete võrdlus keeruline, sest see eeldab võrdluspunktide omavahelist sidumist. (Ellmann & Oja, 2008)

Kaasaegsema ja uuendusliku meetodina kasutatakse maapinnaliikumiste jälgimiseks ka radarsatelliitide ehk seiret sünteetilise ava radariga (SAR, ingl k *Synthetic Aperture Radar*) varustatud satelliitidelt, millelt saadetakse välja radarisignaal kahelt erinevalt orbiidilt ühele punktobjektile ja arvutatakse nende kahe signaali tagasi peegeldumise faasivahe. SAR tööpõhimõttest tulenevalt paistavad radaripiltidel eriti hästi välja siledad ja tasased pinnad ning metallist objektid. Satelliitseire võimaldab saada korraka suure ala maapinna liikumise kohta (tuhanded km²) informatsiooni, mis on kõrge ruumilise resolutsiooniga ja mille praegune mõõtetäpsus lubab jälgida liikumisi alates 0,5-1 mm/a. Andmetöötlemise maht on selle meetodiga suur, sest saab väga palju erineva kvaliteediga andmepunkte, millest tuleb teatud parameetrite järgi ja uurimiseesmärgi alusel välja sorteerida usaldusväärset teavet andvad punktid. Satelliitseire võimalusi muude eraldiseisvate mõõtetehnikatega (näiteks GPS ja nivelleerimine) ühildades saab tulemuseks väga informatiivse ja kasuliku töövahendi erinevate maapinna deformatsioonide jälgimiseks ja uurimiseks. (Prati et al., 2010)

1.2 Näiteid mujalt maailmast maapinna vajumise kohta

Itaalias Veneetsias rannikumadalikul on maapinna vajumisi jälgitud üle 50 aasta, alates 1960. aastatest, mil oli jõudnud juba mõjuma hakata pärast II maailmasõda, 1948. aastast alanud veetarbimise suurenemine. Maapinna vajumist põhjustasid peale põhjavee taseme alanemise veel setete loomulik tihenemine ja mereveetaseme tõus. Perioodil 1950-1969. aasta oli maapinna vajumise kiiruseks 4,5 mm aastas (endise alla 1 mm aastas asemel). 1970. aastate alguses lõpetati Veneetsia keskosas toimunud suuremahuline põhjavee väljavõtt Kvaternaari setetes olevast põhjaveekompleksist ning sellega lõppes selles piirkonnas põhjavee taseme alanemisest põhjustatud maapinna vajumine.



Joonis 2. Maapinna liikumise kiirus (mm aastas) Veneetsias ja selle ümbruskonnas perioodil 1992-2002. aasta (Tosi et al., 2009). Positiivsed väärtused tähistavad maapinna tõusu, negatiivsed väärtused maapinna vajumist.

Hilisemal perioodil on Veneetsia rannikumadalikul toimunud loomulik pikaajaline maapinna vajumine sügavate maakoore toimuvate protsesside ja Kvaternaari setete konsolidatsioonilise tihenemise ja vajumise tõttu. Ajavahemikul 1992.-2002. a on Veneetsias satelliitseire (InSar) andmete järgi maapinna liikumine piirkonna siseselt erinevatel aladel erineva iseloomuga, on täheldatud nii maapinna mõningast tõusu kiirusega 1-2 mm aastas kui ka vajumist kiirusega kuni 10 mm aastas (Joonis 2). Viidatud allika autorite arvates on maapinna tõusu põhjuseks maakoore tektoonilised protsessid, maapinna vajumist on aga põhjustanud soolase merevee sissetung savikihtidesse nõrgendades savi tugevusomadusi, samuti pinnases leiduva orgaanilise aine lagunemine ning pinnase koormamine uute ehitistega maapiirkondade linnastumise käigus. (Tosi et al., 2009)

Klassikalise näitena maapinna vajumise kohta saab tuua Mehhikos asuva Mexico linna, mille aluseks on sajakonna meetri paksune vulkaanilise päritoluga montmorilloniitsavi lasund. Maapinna vajumiskiirused on olnud kuni 40 cm aastas, koguvajum ulatub linna keskosas juba üle 10 meetri. Seda on soodustanud põhjavee intensiivne eksploatatsioon, ajavahemikul 1975.-2002. a tekitas intensiivne veevõtt Kvaternaari setetes olevast põhjaveekihist põhjavee taseme alanduse kuni 70 m. (López-Quiros et al., 2009)

Vajumise kohta saab näiteid tuua ka naaberriigi Soome lõunapoolsetest Turu ja Helsingi linnadest. Turu linn on ehitatud üle kümne meetri paksusele savikihile ning suurimad vajumised on seal toimunud linna keskosas. Põhjavee taseme alanemine on põhjustanud vanade puidust vaivundamentide lagunemise ning nende rekonstrueerimine on väga kulukas. Ka Helsingis on täheldatud maapinna vajumisi, ent mitte nii ulatuslikke kui Turus. Helsingis on probleemsed piirkonnad näiteks endisele merepõhjale ehitatud keskraudteejaam ja kunagisele soisele alale ehitatud Malmi lennujaam, mis on perioodil 1992.-2002. a vajunud kiirusega vastavalt 3 mm ja 2 - 5 mm aastas. Samuti toimuvad siiani vajumised ka mõningate elurajoonide aladel, mis on rajatud nõrkasid savi- ja mudakihte sisaldavale pinnasele. (Karila et al., 2005)

1.3 Maapinna vajumistest Eestis

Tallinnas on vajumisi põhjustanud jääajajärgsete (Kvaternaari ajastus Holotseeni ajastikus tekkinud) nõrkade savipinnaste tihenemine, eelkõige mattunud ürgorgude piires, kus nende paksus on kohati üle 20 m. Suurimad vajumised on olnud Tallinna kesklinnas Narva maantee ja Jõe tänava ristmiku ümbruses 1960. aastate alguses kuni 35 mm aastas (Vilo, 1986). Perioodil 1980.-1986. a oli kesklinnas maapinna vajumise kiirus kuni 5 mm aastas, 2008. aasta nivelleerimisandmete järgi on Tallinna kesklinna alal juba maapinna vajumine peatunud (Ojamäe, 2010).

Tartus on põhjustanud lokaalvajumist Emajõe lammi eripinnaste ja kultuurkihi tihenemine kiirusega 2-3 mm aastas, millele lisandub ehitiste jätkuv vajumine nii aluse aeglase konsolidatsiooni kui ka liiklusvibratsiooni ja vundamentide puitosade (parved, vaiad) lagunemise tõttu, mida põhjustas pinnaseveetaseme alanemine 1960.-1980. aastatel (Vilo, 1986). Peamiselt on Tartus ebahühtlaselt vajunud ja pragunenud just puitvaivundamentidele ehitatud suured hooned nagu näiteks Tartu Ülikooli raamatukogu, Jaani kirik ja Tartu Ülikooli

peahoone, mis vajus suurima kiirusega 5 mm aastas perioodil 1973.-1975. a. Hoonete vajumisi on toimunud ka Poe tänava kvartalis, kuhu rajati raudbetoonist vaivundamentidele 1950. ja 1970. aastate alguses nelja- ja viiekordsed elumajad, mis vajusid 1960.-1970. aastatel kiirusega kuni 3 mm aastas. (Lokotar, 2005)

Eestis esineb ulatuslikke maapinna vajumisi ka kaevandatud aladel Kirde-Eestis, kus põlevkivi allmaakaevandamise käigus tekkinud tühemikud põhjustavad deformatsioone ehk vajumisi, mille mõju ulatub maapinnani. Allmaakaevandamisega kaasneva lae varisemise tagajärjel vajunud maapinda on Kirde-Eestis pindalal üle 130 km², vajumite ulatus koos järelvajumisega on umbes 1,5-2 m (Liblik et al., 2005). Kaevandamisjärgne vajumise põhiline negatiivne mõju avaldub veetaseme tõusus langatusaladel, kuna siis muutub pinnase veerežiim ja võib langeda mullaviljakus ning samuti muutub maapinna reljeef (Joonis 3), mis võib tekitada probleeme metsa- ja põllumaa harimisel (Toomik, 1999). Kamberkaevandamisega ei kaasne lae langetamist ning peale kaevandamist toimub maapinna vajumine üksnes kuni 2 cm, aga tegelikkuses on kamberkaevandatud alad ebastabiilsed ja seal võib toimuda hilisem kaevetervikute varisemine (Liblik et al., 2005).



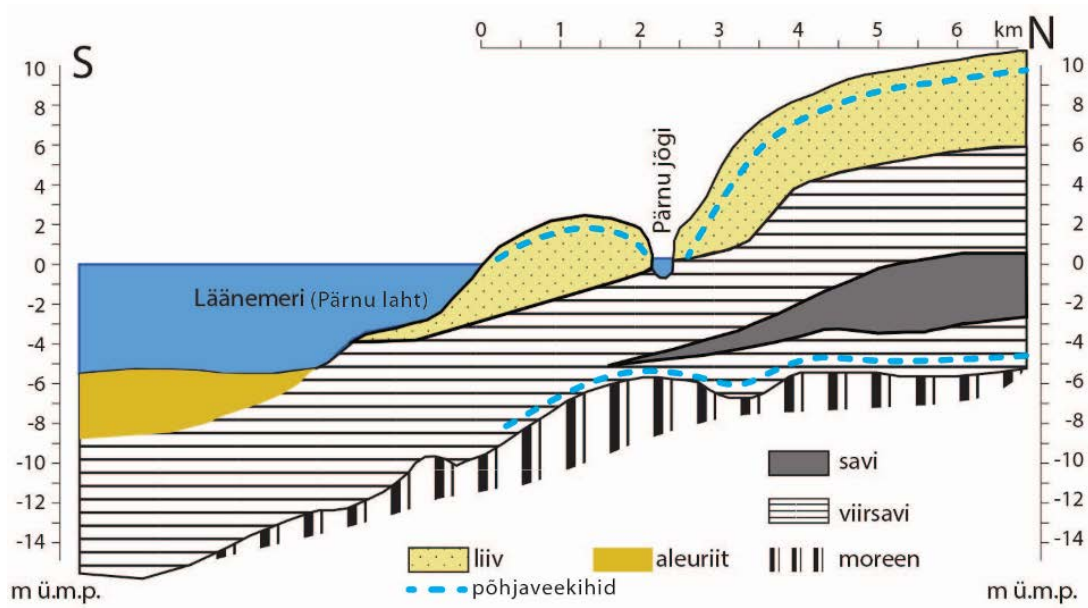
Joonis 3. Kamberkaevandatud alal maapinna vajumiste tõttu tekkinud „muustriline“ pinnase mikroreljeef Kirde-Eestis Sompa, Servaääre ja Kahula alevikes (Maa-ameti geoportaal).

2 Uuringuala ülevaade

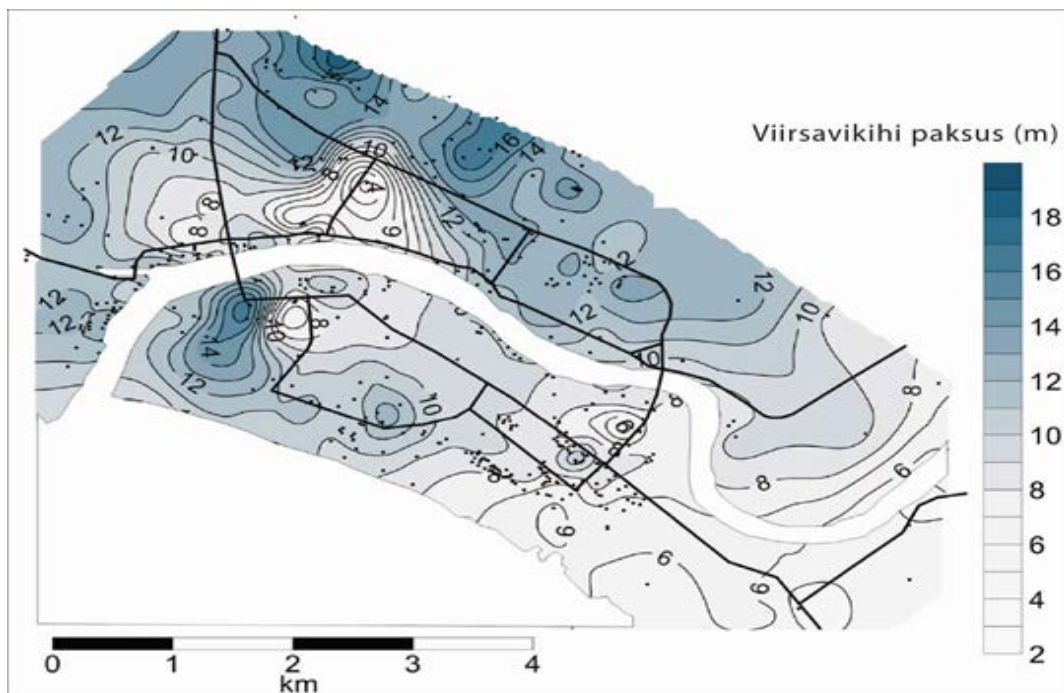
Uuringualaks olev Pärnu linn asub Edela-Eestis Pärnu lahega piirneval Pärnu madalikul. Maapinna absoluutkõrgus linna piires ulatub mõnest meetrist kuni 15 meetrini, enamasti ei ulatu see üle 10 meetri. Ala on tasase ja lauge reljeefiga, mida liigestavad madalad liivast rannavormid ja mõne meetri kõrgused luited ning kuni 10 meetri sügavused jõeorud. Pärnu lahe ümbruses asuva Pärnu linna pinnamoodi kujundavad akumulatiivsed meretasandikud, kus moreen ja jääjärveline savi on kaetud Läänemere eri arengujärkudel kuhjunud liivadega. Tänapäevast pinnamoodi liigestavad erivanuselised, valdavalt luigestunud rannamoodustiste vööndid. Lauge reljeef ja savipinnaste vähene filtratsioonivõime on soodustanud soostumist ning linna põhjapiiril ja kaugemal sisemaal algavad ulatuslikud soomassiivid. (Hang et al., 2008)

2.1 Geoloogiline ehitus

Pärnu linn paikneb viirsavibasseini alal, kus geoloogilises ehituses moodustavad pinnakatte ülemise kihi Litoriaamere setted, põhiliselt tolmliid, kihipaksusega 2-6 meetrit. Eelmiste all levib viirsavi keskmise kihipaksusega 8-14 meetrit (Joonis 5; Talviste et al., 2012), mis on settinud viimase jääaja jääjärve setetest. Viirsavi lamamiks on glatsiaalsed ja fluvioglatsiaalsed setted – moreen, veeristega kruus ja keskliiv, kihipaksusega keskmiselt umbes 5 meetrit. Aluspõhja ülemise osa moodustavad Siluri vanusega karbonaatsed aluspõhja kivimid: lubjakivid, dolomiidistunud lubjakivid ning mergli vahekihtidega lubjakivid. Kuna Pärnu asub Siluri ja Devoni kontaktil, siis esineb Pärnu lõuna- ja kaguosas aluspõhja ülaosas ka Pärnu lademe liivakivi (Vilo, 1962; Hang et al., 2008).



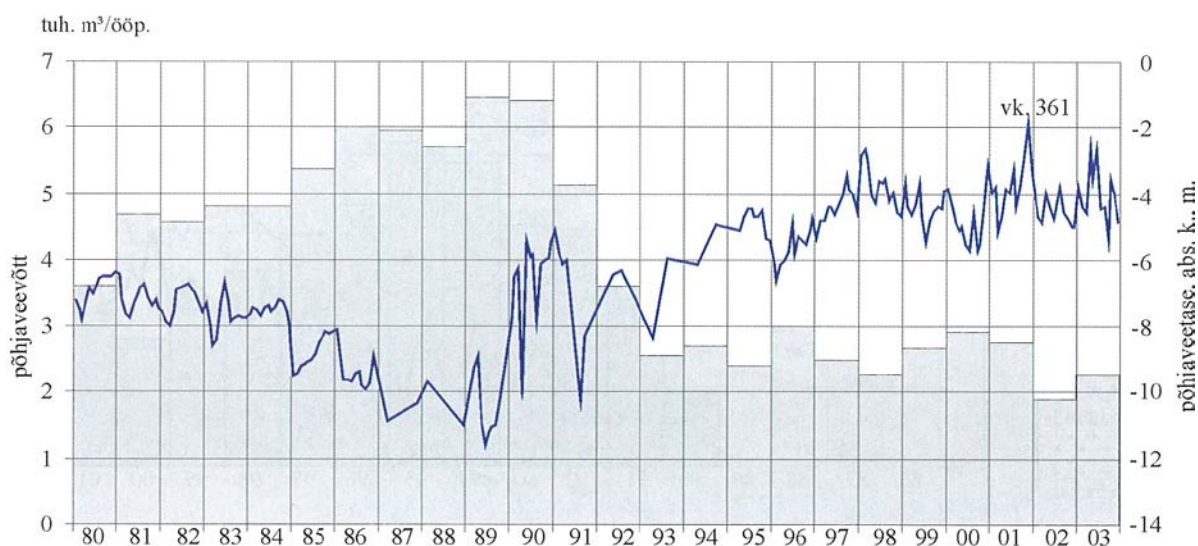
Joonis 4. Pärnu linnale iseloomulik geoloogiline läbilõige koos pinnakattes asuvate surveta ja survealuse põhjaveekihiga (Talviste et al., 2012 järgi).



Joonis 5. Viirsavikihi paksus Pärnu linnas (Talviste et al., 2012 järgi), savikihi paksus meetrites näidatud isojoontega.

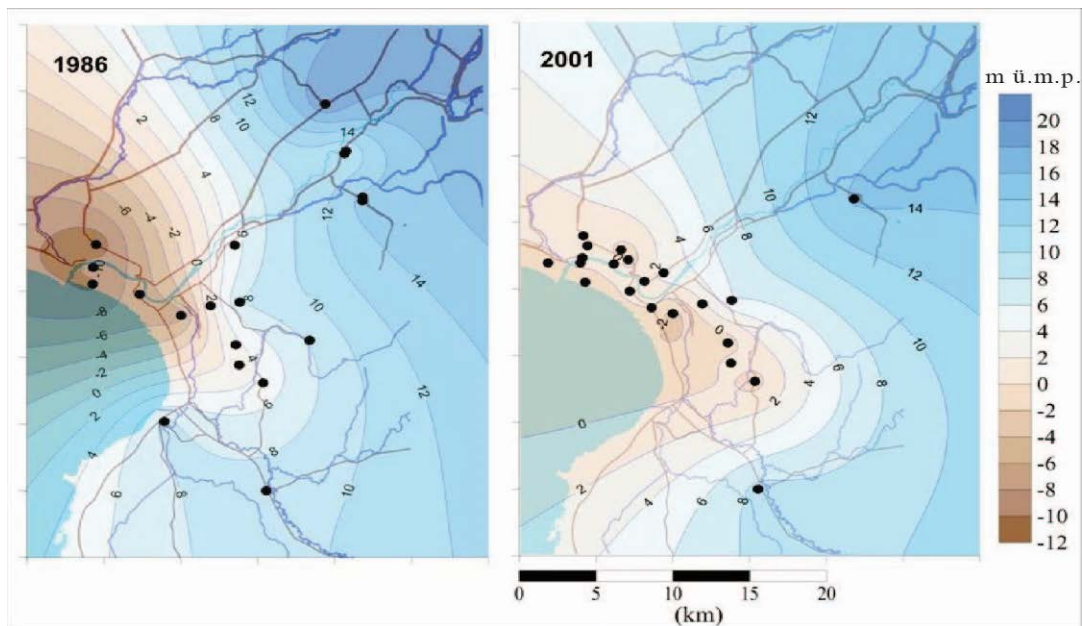
2.2 Põhjavee taseme pikaajalised muutused

Pärnus esineb kvaternaarisetetes kaks veekihti (Joonis 4), mida veepidemena eraldab savipinnaste kompleks. Ülemine, mereliivades esinev vabapinnaline veehorisont on suhteliselt stabiilse veetasemega, esineb üksnes veetaseme sesoonne kõikumine. Viirsavikihi all asub fluvioglatsiaalsete ja glatsiaalsete setete survealine veekiht, mis on seotud moreeni, glatsiofluviaalsete setete ja aluspõhja ülemise osaga. Aluspõhja kivimites on Pärnu alal esindatud Kesk-Alam-Devoni-Siluri, Siluri-Ordoviitsiumi ning Ordoviitsiumi–Kambriumi veekompleks. Käesoleva töö kontekstis pööratakse põhitähelepanu viirsavi all olevale survealisele veekihile, mis on hüdrauliliselt seotud aluspõhja kõige ülemise veekihiiga.



Joonis 6. Survelise veekompleksi põhjaveevõtu ja -taseme muutused Reiu veehaardel (Boldõreva, 2003).

Survelise põhjavee tase Pärnu linna alal on perioodil 1960.–2010. a läbi teinud suured muutused (Joonisel 6 toodud 1980.–2003. a andmed). Seoses tööstuse arenguga alates 1960. aastatest intensiivistus veetarbimine Pärnu linnas, mille tagajärjel hakkas alanema survealise veehorisondi survetase, 1965. aastat kohati kiirusega kuni 1 meetri aastas. Maksimaalne veetarbimine oli 1988.–1990. a, mis põhjustas veetaseme survetaseme languse suurusjärgus 10–12 meetrit. Seejärel on veetarbimine vähenenud ja sellest tulenevalt põhjavee tase tõusnud ning alates 2003. aastast on veetase stabiliseerunud.



Joonis 7. Põhjavee taseme muutus Pärnu linnas 1986. ja 2001. aasta võrdluses (Kohv, 2011).

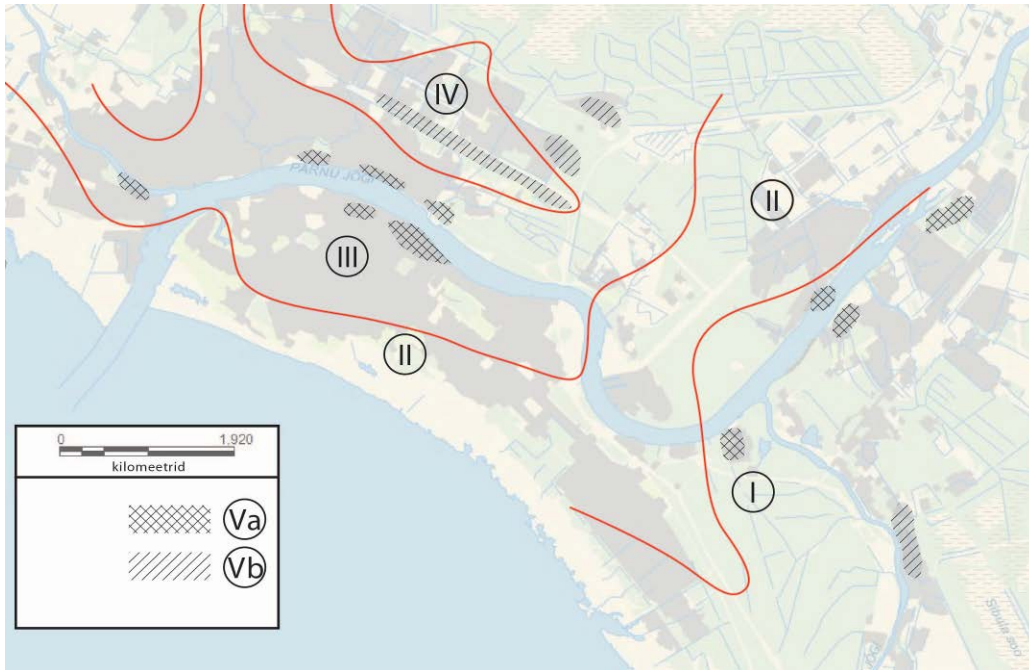
Veetaseme tõus on põhjustatud veevõtu vähenemisest alates aastatest 1990.-1993. linnalähedasest Reiu veehaardest. 1990. aastal avati linnast kagu poole jääv Vaskrääma veehaare, misjärel hakkas põhjavee depressioonilehtri kese liikuma linnast ida ja kagu poole (Joonis 7; Kohv, 2011).

2.3 Maapinna vajumise iseloom Pärnus perioodil 1960.– 1988. a

Uuringualaks olevas Pärnu linnas on maapinna vajumised põhjustatud suure kokkusurutavusega viirsavikihi olemasolust geoloogilises ehituses (Vilo, 1962; 1986), mille paksuseks on keskmiselt 8-14 meetrit (Talviste et al., 2012). Perioodil 1960.-1988. oli Pärnu linnas erinevate mõõdetud objektide lokaalvajumise suurus vahemikus 206-890 mm, mis oli 1,2 kuni 4 korda suurem arvatud vajumiste väärtustest, sest alles 1988. a valminud uurimuses selgitati perioodil 1960.-1989. a toimunud põhjavee taseme alanemisega kaasnenud poorirõhu alanemist pinnases, mis on põhjustanud Pärnu alal savikihi konsolidatsioonilise vajumise ning suurendanud ka lokaalvajumisi ehitiste mõjualades. (Listra & Talviste, 1988¹)

Pärnu linna eri piirkondades on geoloogiline ehitus eelkõige liiva- ja viirsavikihi paksuse muutlikkuse tõttu erinev. Tuginedes varasematele uuringutele (Liblik et al., 1989) saab iseloomustada uurimisperioodile eelnenud perioodil (1960.-1988. a) Pärnu linna eri piirkondades toimunud maapinna liikumisi, valdavalt toimusid siis maapinna vajumised. Arvestades ehitusgeoloogilisi tingimusi määravaid pinnasekihtide lasumistingimusi,

geotehnilisi omadusi ning toimunud geoloogilisi protsesse maapinna vajumise näol, on eristatud viis erinevat piirkonda (Joonis 8; Tabel 2).



Joonis 8. Perioodil 1960-1988. a Pärnus maapinna vajumise kiiruste järgi moodustatud rajoonid. Tähiste seletus toodud Tabelis 1.

Tabel 2. Perioodil 1960.-1988. a Pärnu linnas maapinna vajumise kiirus erinevates piirkondades ning piirkondade kirjeldus (Liblik et al., 1989).

Piirkonna tähis ja kirjeldus (viirsavikihi ja sellel lamava liivakihi paksus)	Maapinna lokaalse vajumise kiirus perioodil 1960-1988
I Lõunaosas lasub viirsavil 4-5 m paksune liivakompleks, millest kesklinna ala on ülemine 1,5 kuni 2,5 m asendunud aegade jooksul kultuurkihiga. Sõltuvalt lamami reljeefist võib viirsavi paksus olla 5 m kuni 20 m.	mere ääres 2-7 mm aastas, valdavalt 5-11 mm aastas.
II Idaosas on liivakompleksi omadused ja paksus erinevad, viimane varieerub vahemikus 1 - 7 meetrit. Viirsavilasundi paksuseks on 5 - 7 meetrit.	Raekülas ja Pärnu jõe vasakul kaldal 0 -4 mm aastas ning paremal kaldal 2 -7 mm aastas

<p>III Põhjaosas on liivakompleksi paksus keskmiselt 4–5 meetrit, viirsavikihi paksus ulatub kohati kuni 30 meetrini, ala idaosas on minimaalne kihipaksus 13–15 meetrit.</p>	<p>Seoses intensiivse ehitustegevusega on piirkonna lõunaosas kuni 20 mm aastas, valdavalt on piirkonnas vajumise kiiruseks olnud 10 mm aastas.</p>
<p>IV Keskosas on iseloomulik õhukese, paksusega 1–3 meetrit, liivakompleksi esinemine. Viirsavi kihipaksus on muutlik, sõltudes viirsavi pealispinna ja lamava pinnareljeefist.</p> <p>Kohati ei esine viirsavi üldse, näiteks Raba ja Oja tänavate ristmikul lasub mereliiv vahetult fluvioglatsiaalsetel setetel.</p>	<p>kuni 20 mm aastas. Näiteks Ehitajate tee ja Tallinna mnt ääres on vajumisi soodustanud liivakihi vähenenud paksus, kus igasugune dünaamiline koormus mõjub otse viirsavile. Piirkonna keskmine vajumiskiirus on 15 mm aastas, Raba ja Oja tänavate ristmiku ümbruses maapind ei vaju.</p>
<p>V a Pärnu, Sauga ja Reiu jõgede kaldad (kuni 50 m kaldast), kus on olnud iseloomulikud looduslikud ja inimtegevuse tagajärjel tekkivate nõlvaprotsesside esinemine – aeglased roomeformatsioonid kuni maaliheteni välja. Maapinna deformatsioonid on suuremad kui mujal nõlvanähtuste tõttu.</p> <p>V b Ehitajate tee ja Tallinna mnt ümbruses paiknevad piirkonnad, kus maapinna deformatsioonid on suuremad kui mujal vibratsioonide tõttu.</p>	

3. Materjalid ja metoodika

Andmed maapinna liikumise kohta on saadud Pärnu Linnavalitsuse planeerimisosakonnas asuvatest vaatlusjaamade passidest ja koondgraafikutelt, kus vaatlusandmestik oli olemas perioodi 1987.-2012. a kohta, mil mõõtmisi viidi läbi üks kord aastas (Talviste, 2012). Töös kirjeldati võimalikult pikkade aegriididega (kuni 2010. a) ja teadaolevate asukoha koordinaatidega reeperite andmeid, mida oli kokku 21 (seina- ja pinnasereeperit.) Vajumisvaatlused on teostatud OÜ Pärnu Maamõõduteenistus poolt.

Lisaks on Pärnu linnas teostatud OÜ Reib poolt Pärnu jõe kallastel geotehnilise kontrolli käigus mõõtmisi maapinna liikumiste kohta perioodil 1987.-2004. a (Kakko & Kärk, 2004). Mõõtmised viidi läbi aastatel 1988-1991, 1999. ja 2004. Kokku mõõdeti ja käesoleva töö käigus digitaliseeritud 48 sein- ja pinnasereeperi liikumisi. Perioodi 1992.-2000. a katmiseks käesolevas töös satelliitseire andmestikuga võrdlemise eesmärgil interpoleeriti lineaarselt liikumised vahepealsete aastate kohta. Graafikutelt ja aruandest saadud andmestik digitaliseeriti, andmetabelis parandati andmete digitaliseerimise käigus tekkinud ja andmete graafilisel kujutamisel ilmnunud trükisestusvead.

Maapinna liikumise andmed on maapinnast 1,5 kuni 1,7 m sügavusel asuvate pinnasereeperite ja madalate hoonete seinareeperite kordusnivelleerimise teel saadud ning need iseloomustavad maapinna liikumist kuni 30 m sügavusel asuvate süvareeperite suhtes. Pinnasereeperite kõrgusandmete usaldusväärsuse kontrollimiseks ja parandamiseks kasutati süvareeperite kontrollmõõdistamise andmeid aruandest (Saavik & Saapar, 1998). Töö eeldus on, et süvareeperid on stabiilsed ehk nende asukoht ei ole muutunud, vastasel juhul süvareeperi suhtes mõõdetud pinnasereeperi kõrgusandmed näitavad süvareeperi vajumise või tõusu võrra vastupidise suunaga liikumist.

OÜ Eesti Geoloogiakeskuse endine töötaja Tarmo All jagas töö autoriga Pärnu linna alal tehtud satelliitseire mõõteandmestikku maapinna liikumiste kohta perioodil 1992.-2000. a. Algandmestikku on analüüsinud ja kirjeldanud eelnevalt Tarmo All ja Mark Karimov (All & Karimov, 2008). Käesoleva töö jaoks on saadud algandmestikku korrastanud ja „puhastanud“ käesoleva juhendaja Marko Kohv, kes eemaldas andmehulgast peegelduspunktid (PSI – ingl keelse termini „Permanent Scatterer Interferometry“ – peegelduspunkti interferomeetria lühend), mille koherents oli alla 0,7 ja mõõtmiste erinevuse standardhälve üle 4,5. Lisaks

eemaldati lidar andmete põhjal kõrgusega üle 13 m hoonetel asuvad PSI-d.

Töö autor „puhastas“ allesjäänud andmestiku jõgede äärsetest 100 m laiustes tsoonides ja lisaks Ehitajate tee, Tallinna ja Riia maanteede äärsetest 50 m laiustest tsoonidest (Joonis 17). Selleks kasutati Map-info programmi abil vastava laiusega tehtud puhvraid ja kustutati kaardipildist eelpool nimetatud aladesse jäänud PSI-d ja reeperid. Selliselt töödeldud andmestik peaks kajastama Pärnu linnas maapinna üldist liikumist, mida mõjutab eeldatavasti eelkõige põhjavee taseme muutused ja viirsavikihi paksus. InSar ja reeperandmestiku töötluse eesmärgiks oli nimetatud seose leidmiseks eemaldada valimist mõõtepunktid, mis asusid piirkondades, kus võib esineda täiendavat maapinna liikumist: raskete (kõrgete) hoonete lokaalne vajumine, maanteede läheduses tekkiv kompaktsioon vibratsiooni tõttu ja jõgede kallastel toimuvate nõlvaprotsesside tõttu.

Maapinna liikumiste seose uurimiseks viirsavi paksuse (Talviste et al., 2012) ja põhjaveetaseme muutuste (Kohv, 2011) vahel interpoleeriti vastavaid perioodi 1992.-2000. a andmeid võrgusammuga 200 m üle terve Pärnu linna. Interpoleerimismeetodina kasutati kriging meetodit, mis on üheks kõige laialdasemalt kasutatavaks meetodiks geostatistikas (Davis, 2002). Interpoleeritud kaartidel otsiti iga vajumisandmestiku punkti kohal paiknev savi paksuse ja põhjaveetaseme muutuse väärtus, kasutades selleks Mapinfo Vertical Mapperi tööriista „Point inspection“. Andmete vaheliste seoste kirjeldamiseks ja visualiseerimiseks kasutati Microsoft Exceli graafikuid ja lineaarset regressioonianalüüsi.

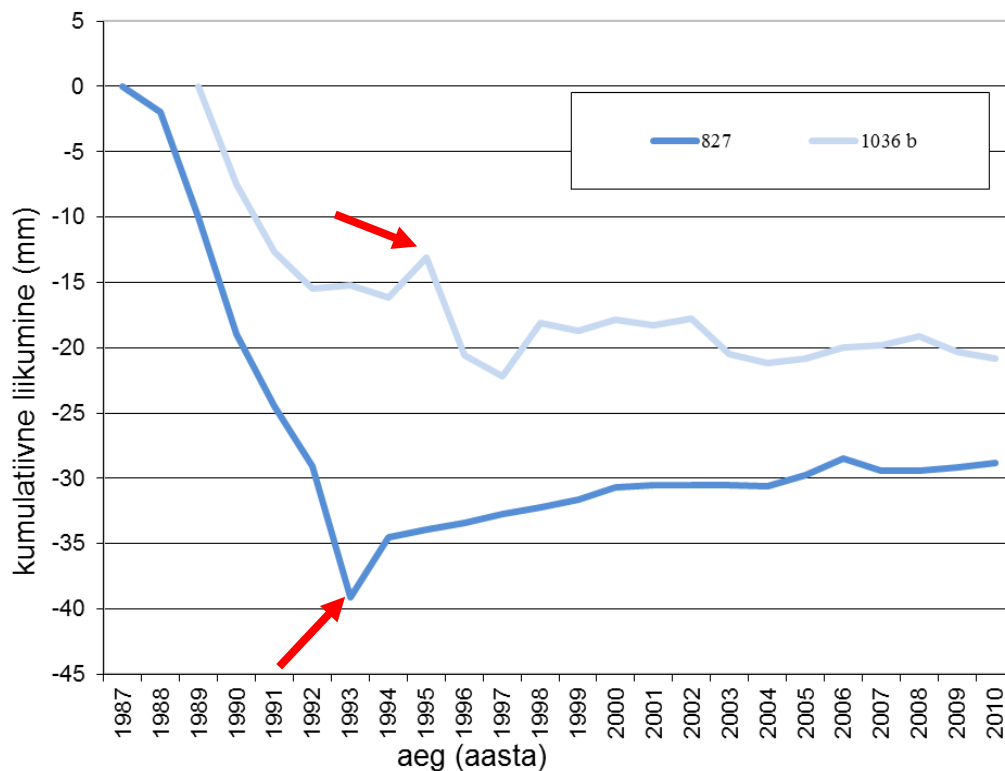
Pärnu linnas hajusalt paiknevate geodeetiliste reeperite mõõdistamisel saadud pikemate ja tihedamate maapinna liikumise andmeridade kohta (1987.-2010. a) on tehtud klasteranalüüs, et grupeerida sarnase liikumise iseloomuga reepereid. Klasteranalüüs on statistiline meetod, millega saab andmeid jaotada gruppidesse ehk klastritesse, kus andmed mingi tunnuse järgi on omavahel sarnased ja ühtlasi erinevad teistest naaberklastritest. Loodus- ja maateadustes enim kasutatav klasteranalüüsi meetod on hierarhiline klasterdamine, mis tähendab, et kogu andmehulgast leitakse esimesena kõige sarnasemad andmehulkade paarid, mis siis ühendatakse omavahel ja mis sellest hetkest on mõtteliselt üks andmehulk. Sellist võrdlust ja andmete liitmist kasutatakse kuni kogu andmehulk koondub ühte gruppi. Klasteranalüüsi tulemusi visualiseeritakse dendrogrammina, millelt nähtub kõige sarnasemad ja kõige vähem sarnased andmehulgad. Sarnasuse mõõtühikuks on Eukleidese distant, mida lühem on see distant seda sarnasemad need paarid või grupid omavahel on. (Davis, 2002). Klasteranalüüs

teostati Exceli lisamooduli Multibase (<http://www.numericaldynamics.com/>) abil, kasutati Ward-i arvutuskeemi ning Eukleidese distantse.

4. Tulemused

4.1 Süvareeperite kontrolli tulemustest

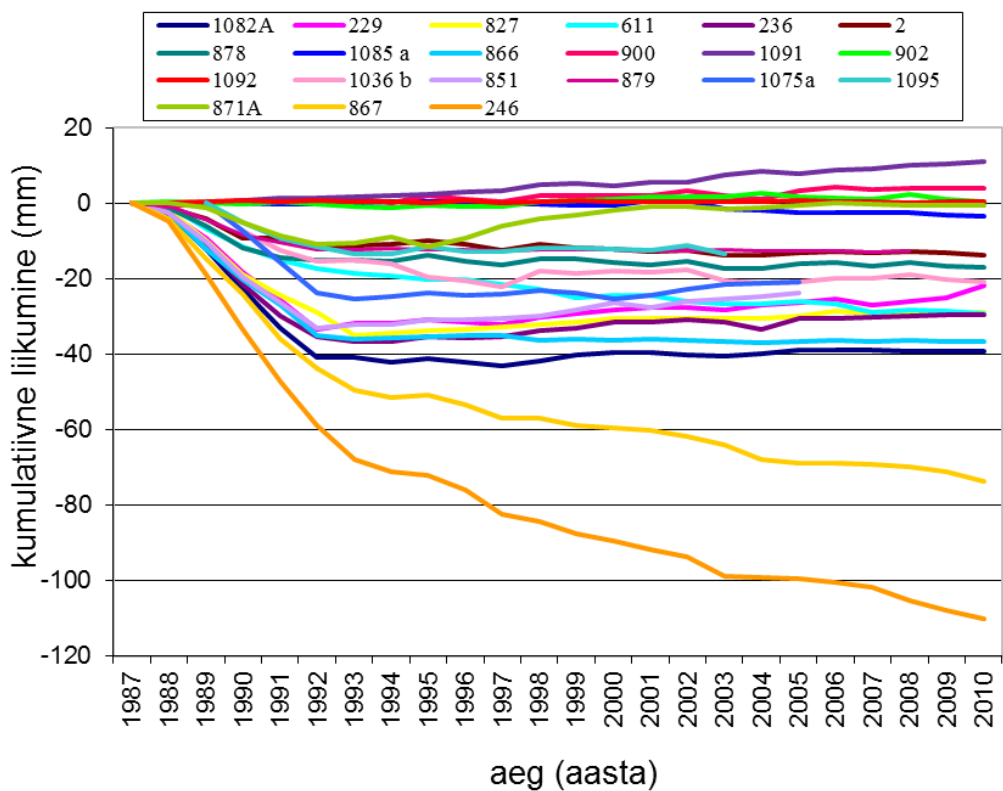
Süvareeperite kontrolli tulemusel parandati süvareeperite liikumise tõttu tekkinud vead kahe pinnasereeperi 1036 b ja nr 827 kõrgusandmetes (Joonis 9). Pinnasereeperiga 1036 b seotud süvareeper 1036 oli 4,4 mm allapoole nihkunud 1995. a ja pinnasereeperiga 827 seotud süvareeper 1035 oli 6 mm ülespoole nihkunud 1993. a (Saavik & Saapar, 1998). Joonisel 9 on toodud reeperite kumulatiivse liikumise graafik perioodi 1987.-2010. a kohta esialgsete parandamata andmetega, millelt on näha, et süvareeperite nihkumised kajastuvad pinnasereeperite liikumistes vastupidise suunaga ning joonisel näha olevad liikumiste ulatused langevad üsna täpselt kokku süvareeperite kontrollmõõtmisel saadud väärtusega.



Joonis 9. Süvareeperite nihete tõttu tekkinud vead aeGRIDades.

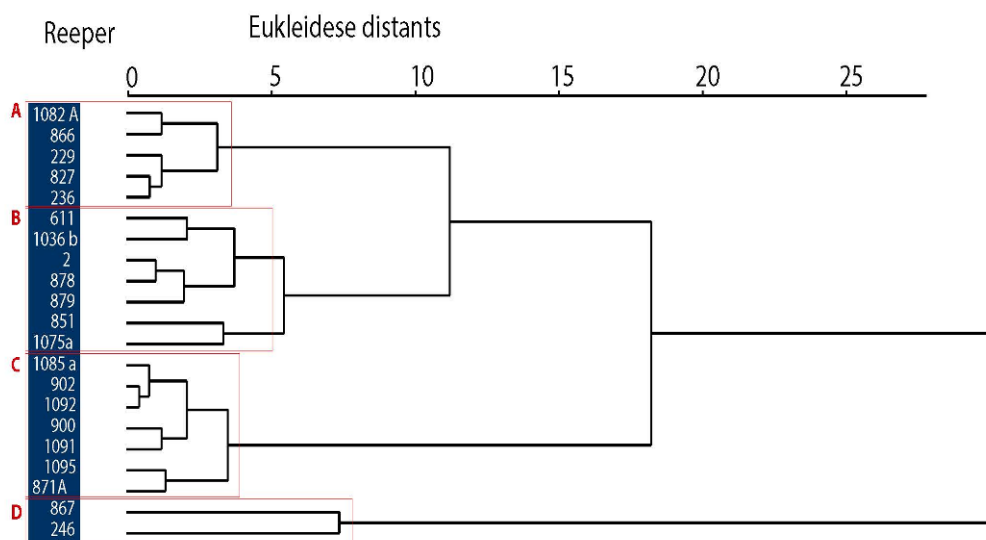
4.2 Linnas hajusalt paiknevate reeperite kumulatiivne liikumine

Joonisel 10 toodud reeperite kumulatiivse liikumise graafikult nähtub, et perioodil 1987.-2010. a enamustel reeperitel algas periood vajumisega, mille kiirus vähenes alates 1992.-1993. a. Sealt edasi vajumine jätkus eelneva perioodiga võrreldes aeglasemas tempos reeperitel 867 ja 246, asendus aeglase tõusuga reeperitel 1091, 900, 901 ja 871A ning ülejäänud reeperitel vajumine peaaegu peatus.



Joonis 10. Reeperite kumulatiivne liikumine perioodil 1987.-2010. a.

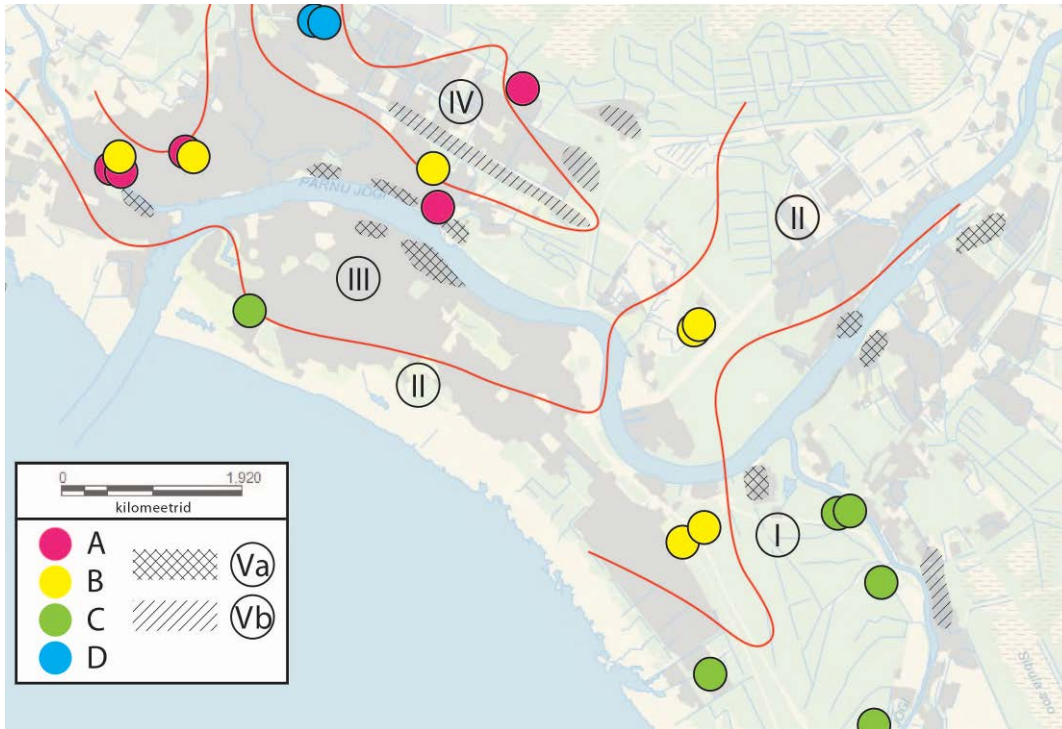
4.3 Klasteranalüüs



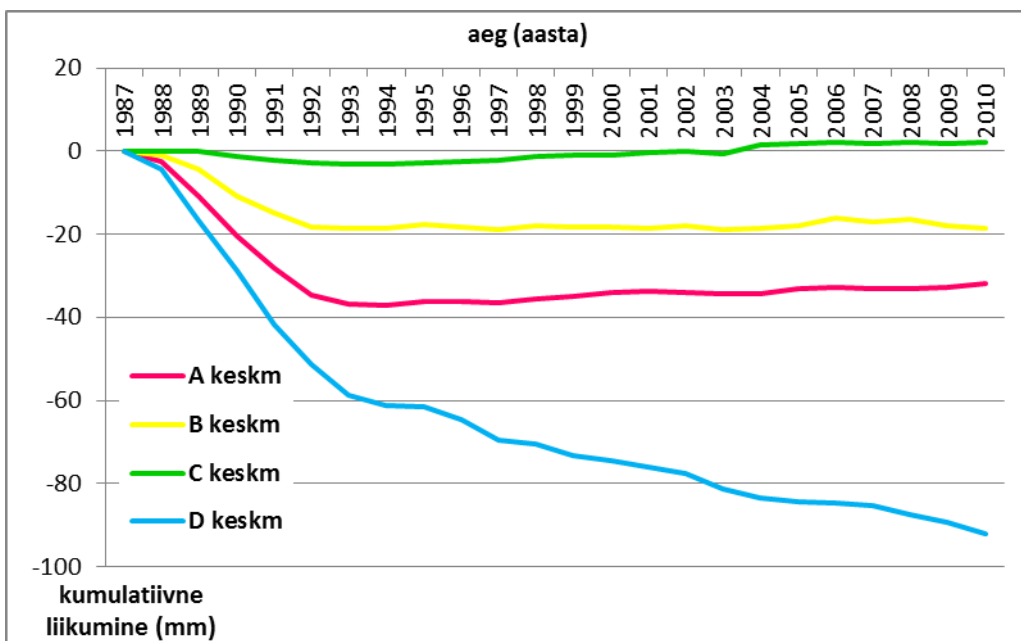
Joonis 11. Dendrogramm klasteranalüüsi tulemustega perioodil 1987.-2010. a reeperite liikumiste kohta.

Klasteranalüüsi tulemusena moodustusid sarnaselt käituvad aegridade grupid (Joonis 11), mis

on märgitud tähistega A - D. Grupeeritud reeperite paiknemine uuringualal on näha Joonisel 12, kus on taustal uurimisperiodile eelneva perioodi 1960.-1988. a kohta tehtud uurimuste alusel maapinna liikumiste iseloomude järgi eraldatud rajoonid (Liblik et al., 1989 järgi).



Joonis 12. Linnas hajusalt paiknevate reeperite (1987.-2010. a aeGRIDadega) grupeerumine ruumis klasteranalüüsi tulemusel. Taustal uurimisperiodile eelneval perioodil esinenud vajumiste kiiruste järgi eraldatud piirkonnad (Joonis 8; Tabel 2).



Joonis 13. Klasteranalüüsi tulemusena moodustunud reeperite gruppide kumulatiivse

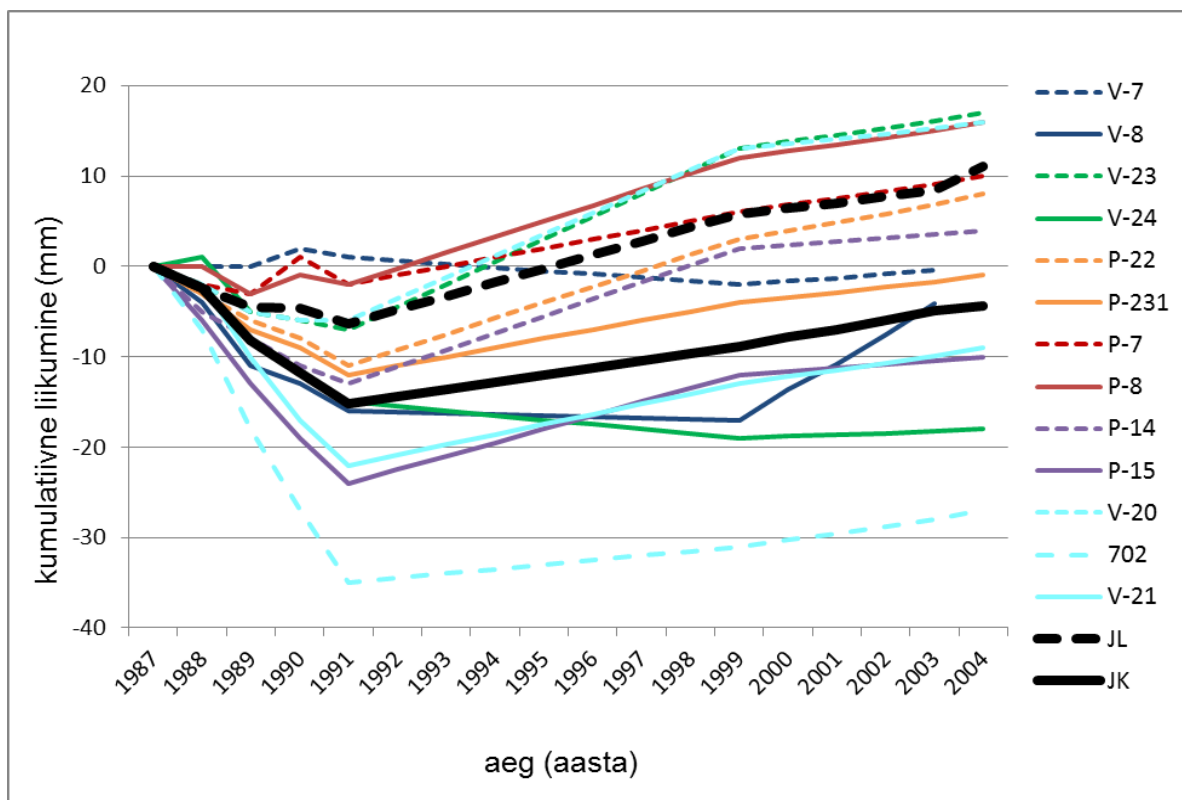
liikumise keskmised väärtused perioodil 1987.-2010. a.

Joonistelt 12 ja 13 nähtub, et linna loodeossa jäävale grupile D on iseloomulik pidev vajumine läbi kogu mõõteperioodi, mis tänaseks päevaks on mõnevõrra aeglustunud võrreldes perioodiga 1987.-1992. a. Sellele grupis on ka kõige suuremad geodeetiliselt mõõdetud maapinna liikumised (110 mm perioodil 1987.-2010. a). Gruppide A ja B käitumise on sarnane, erinevus esineb 1987.-1993. a tekkinud vajumiste ulatuses, mis on vastavalt 37 mm ja 19 mm. Gruppi C kuuluvate reeperite vajum oli kõige väiksem, ulatudes 1993. aastaks väärtuseni 3 mm, alates 2003. aastast on selle grupi reeperid näidanud tõusu kuni 2 mm üle 1987. a alguspunkti väärtusest.

Üldiselt ühtivad klasteranalüüsiga moodustunud reeperite grupid varasemate uuringute alusel koostatud linna piires erinevat maapinna liikumist iseloomustavate rajoonidega. Praegune grupp D, kus olid suurimad vajumised, on varasematesandmetes piirkond IV, kus olid suurimad vajumised (> 10 mm aastas). Ka klastrid A ja B oma liikumise iseloomudega ja asukohtade järgi ühtivad varasemate piirkondadega, kus vastavalt olid keskmised liikumised 8 mm ja 5 mm aastas. Väikseimate liikumistega oli varasem piirkond I, mis kattub praeguses töös oleva grupi C alaga, kus maapinna vajumine asendus tõusuga.

4.4 Pärnu jõe mõju tema kallastel asuvate reeperite liikumisele

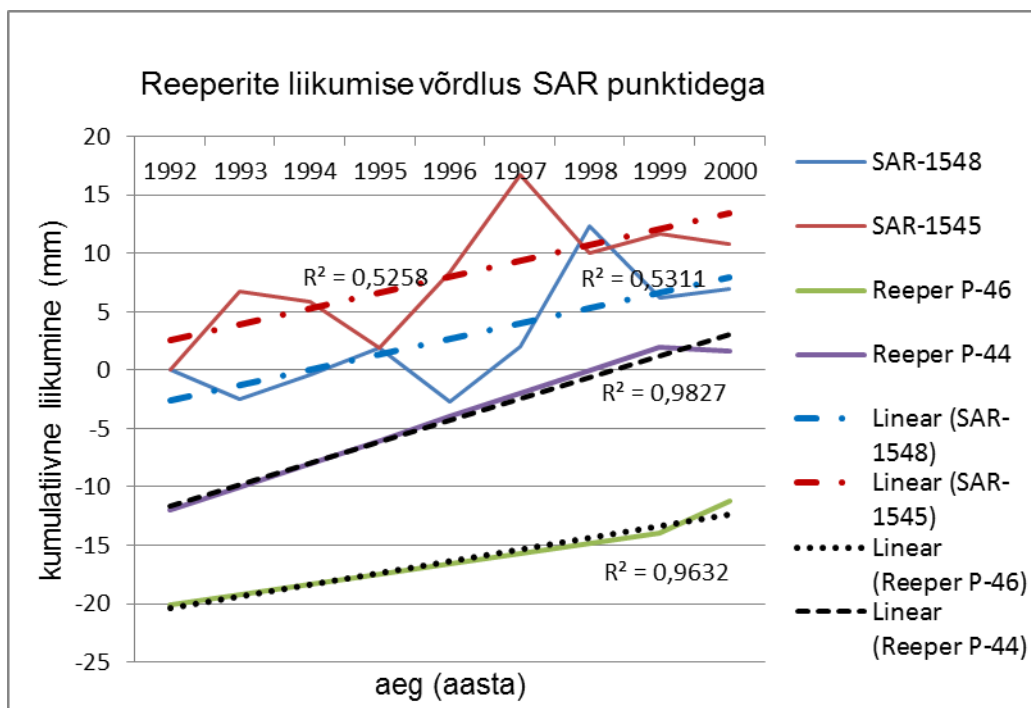
Joonisel 14 toodud jõeäärsete reeperite liikumise järgi on näha, et jõe lähedal paiknevate reeperite liikumised on väiksemad, suurem erinevus jõest kaugemal paiknevatest reeperitest ilmneb selgelt perioodil 1987.-1992. a, mil toimus maapinna vajumine. Sel perioodil vajusid jõe lähedal olevad reeperid keskmiselt 6 mm ning jõest kaugemal paiknevad reeperid keskmiselt 15 mm. Hilisemal perioodil oli kõigi võrreldud jõeäärsete reeperite liikumise iseloom sarnane, toimus ühtlase kiirusega reeperite tõus. Jõe lähedal paiknevad reeperid saavutasid keskmiseks tõusuks 17 mm, mis on 10 mm üle 1987. a alguspunkti väärtusest ning jõest kaugemal paiknevad reeperid olid 2002. aastaks keskmiselt tõusnud 11 mm, mis on 4 mm vähem 1987. a alguspunkti väärtusest.



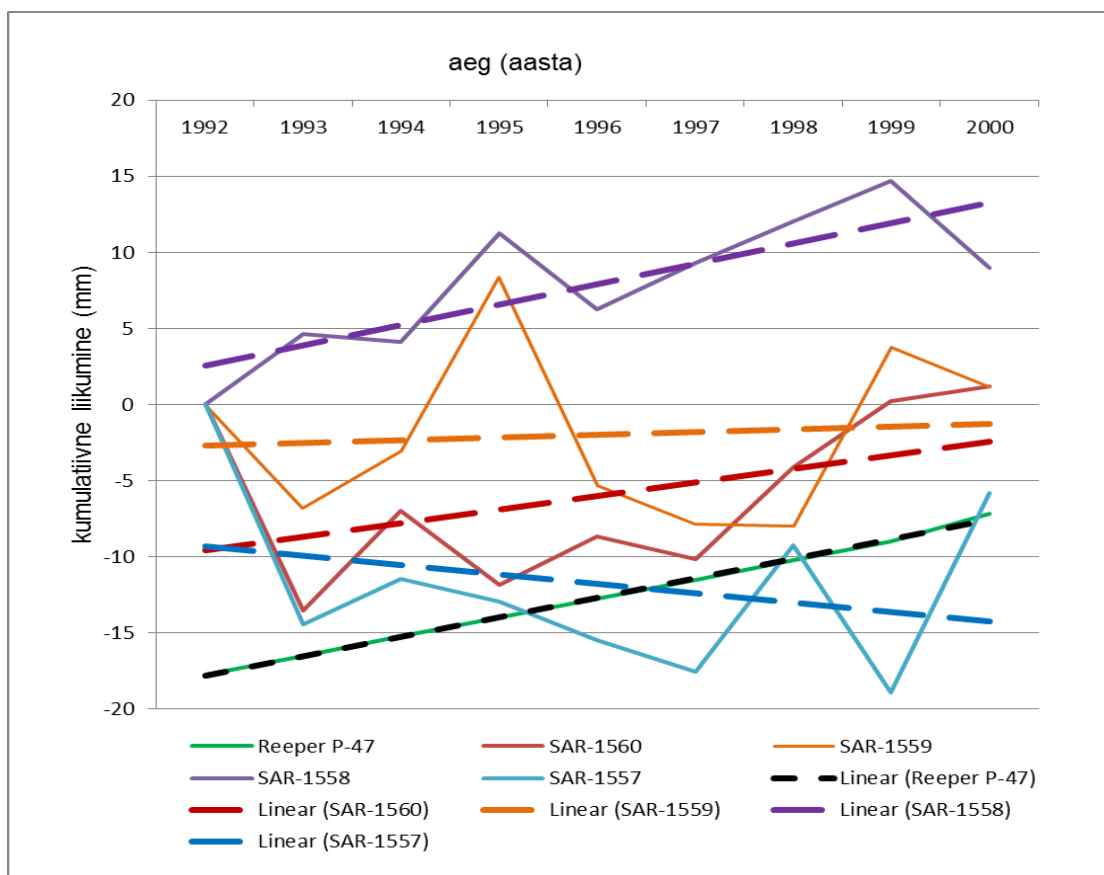
Joonis 14. Pärnu jõe äärsete jõe lähemal ja jõest kaugemal ligikaudu samal jõega risti oleva mõttelisel joonel paiknevate reeperite kumulatiivse liikumise võrdlus. JL ja JK – jõe lähemal ja jõest kaugemal asuvate reeperite liikumiste keskmised väärtused.

4.5 Satelliitseire andmete ja reeperite liikumise võrdlus

Satelliitseirega Pärnu linnas maapinna liikumiste kohta perioodil 1992.-2000. a saadud andmestikuga võrdlemiseks leiti programmi Map-Info võimalusi kasutades SAR punktide läheduses (23 m kuni 75 m) asuvaid reepereid ning võrreldi mõõtmistulemuste kattuvast perioodil. Joonisel 15 toodud SAR punktid (edaspidi PSI ehk peegelduspunkt) 1548 ja 1545 paiknevad omavahel lähestikku, reeper P-46 asub PSI-dest ~ 32 m kaugusel, reeper P-44 asub ~ 45 m kaugusel. Tegemist on Pärnu jõe äärsete pinnasereeperitega, mis asuvad jõe parema kaldal (jõest lõuna pool). Jooniselt 15 on näha, et reeperite ja PSI-ide



Joonis 15. Perioodil 1992.-2000. a kahe reeperi näitel maapinna liikumise andmete kokkulangevus võrreldes satelliitseire andmetega. Punktiirjoonega näidatud lineaarsed trendid.

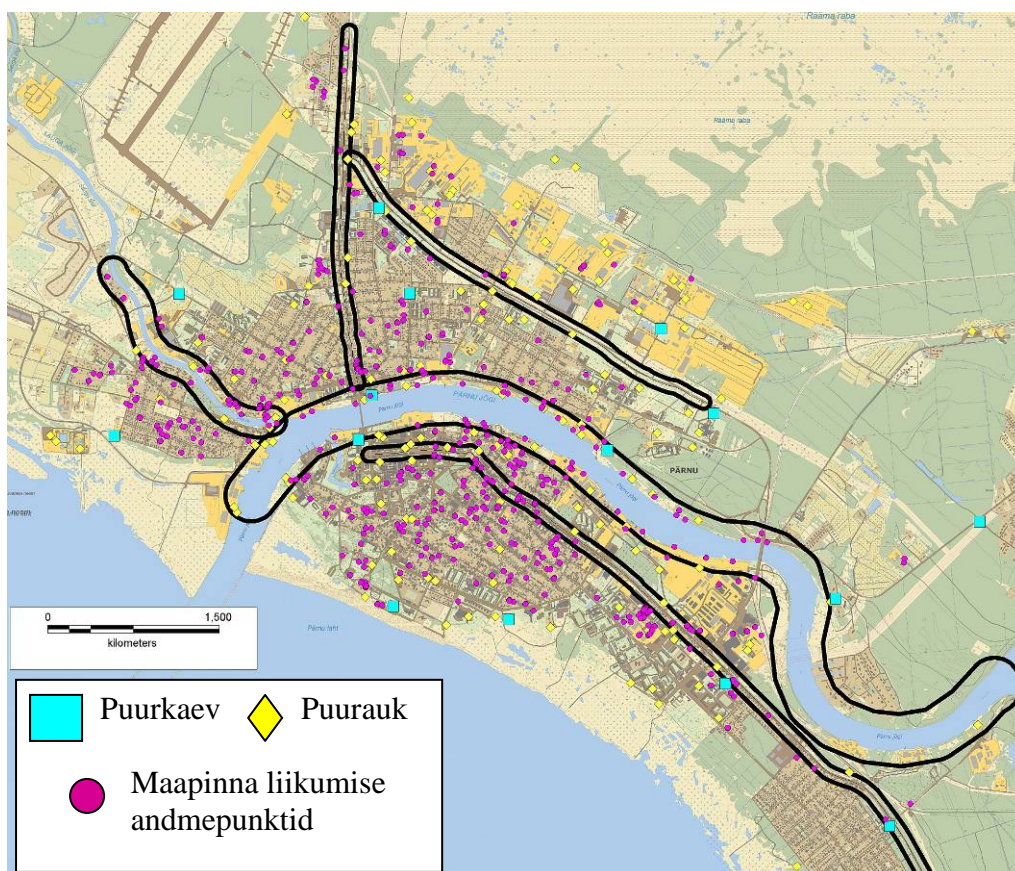


Joonis 16. Perioodil 1992.-2000. a reeperi P-47 näitel maapinna liikumise andmete kokkulangevus võrreldes satelliitseire andmetega. Punktiiriga näidatud lineaarsed trendid.

Joonisel 16 on toodud Pärnu jõe äärses reeperi P-47 liikumine ja selle ümbruses kuni 24 m kaugusel asuvatelt SAR peegelduspunktide (PSI) saadud maapinna liikumise andmed perioodi 1992.-2000. a kohta. Graafikult ilmneb kahe PSI liikumise trendi ühtimise reeperi omaga, erinevad on PSI-de 1559 ja 1557 liikumised.

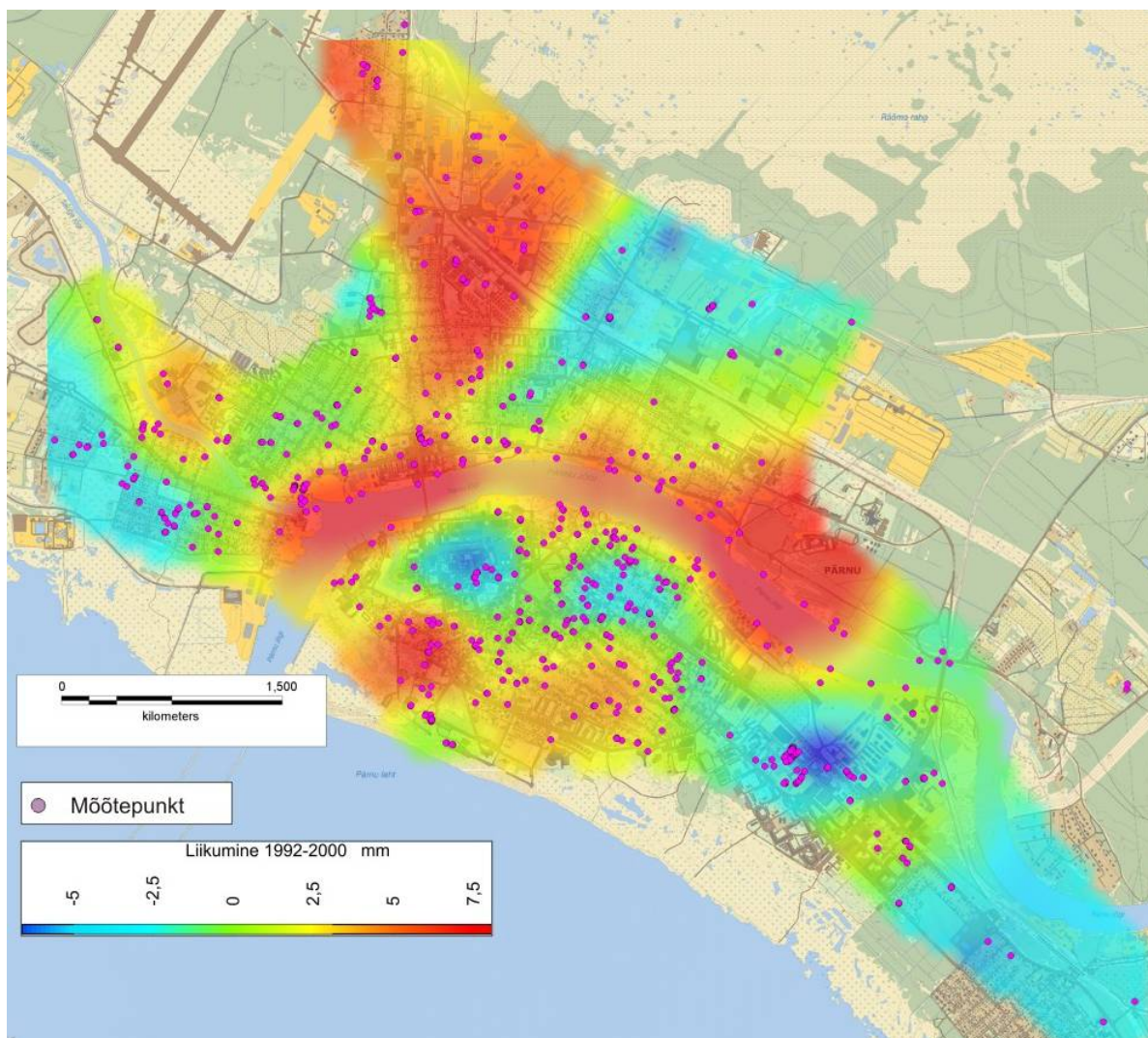
4.6 Maapinna liikumiste visualiseering perioodi 1992.-2000. a kohta

Käesoleva töös kasutatud satelliitseire algandmestikust (~4700 PSI-d) on eemaldatud punktid mille koherents oli alla 0,7 (alles jäi 873 PSI-d) ja mõõtmiste erinevuse standardhälve üle 4,5 (alles jäi 732 PSI-d). Lisaks eemaldati lidar andmete põhjal kõrgusega üle 13 m hoonetel asuvad PSI-d (jäi 607 PSI-d). Viimase etapina „puhastati“ allesjäänud andmestik jõgede äärsetest 100 m laiustes tsoonidest ja lisaks Ehitajate tee, Tallinna ja Riia maanteed äärsetest 50 m laiustest tsoonidest, misjärel jäi alles 274 satelliitseire peegelduspunkti. Selle andmehulgaga tehti analüüs maapinna liikumise võimaliku sõltuvuse kohta põhjavee survetaseme tõusust ja savikihi paksusest.



Joonis 17. Kasutatud andmestiku paiknemine uuringualal koos jõgede äärsete 100 m ja suurte teede äärsete 50 m laiuste puhvritega.

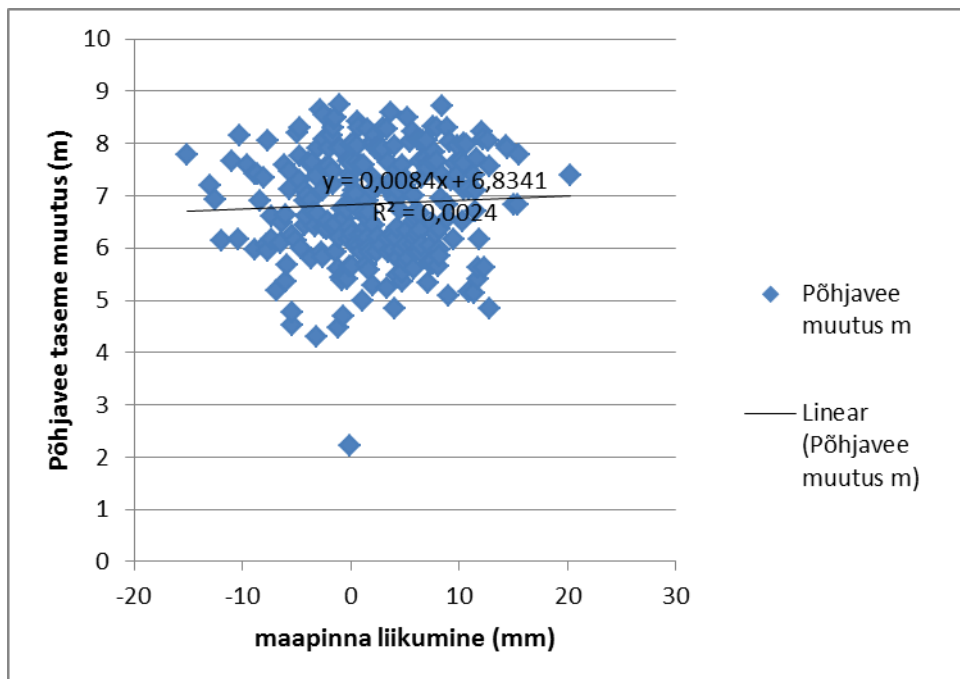
Joonisel 17 on toodud jõgede ja teede puhvrid, milles asunud reeperid ja PSI-d eemaldati enne maapinna liikumise ja surveveetaseme ning savipaksuse vahelise lineaarse regressiooni mudelite tegemist.



Joonis 18. Pärnu linna maapinna liikumiste visualiseering perioodi 1992.-2000. a kohta.

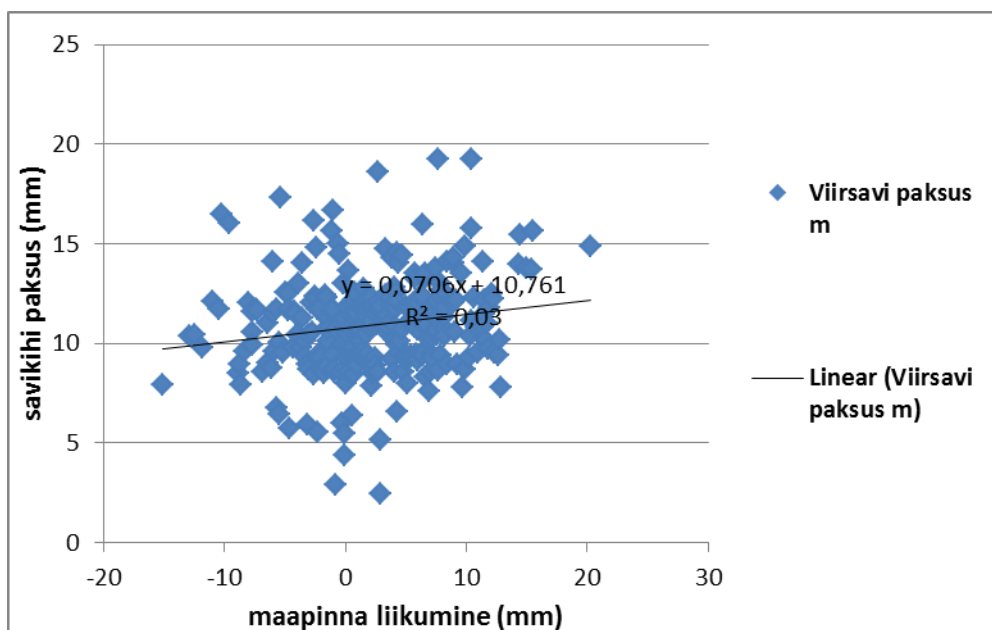
Programmi Map-Info tööriistaga Vertical Mapper valmistatud maapinna liikumiste kaardi järgi Joonisel 18 on näha, et linnas kolmes piirkonnas on valitud perioodi jooksul maapind tõusnud kuni 7,5 mm. Ühtlasi näitab vajumiste kaart ka mõningate lokaalse iseloomuga maapinna vajumiste alasid, kus vajumise ulatuseks on kuni 5 mm. Vajunud ja tõusnud piirkondade vahelistel üleminekuvaladel pole andmete järgi maapind liikunud.

4.7 Maapinna liikumiste seos põhjavee survetaseme tõusu ja savikihi paksusega



Joonis 19. Korrelatsioon maapinna liikumise ja põhjavee taseme muutuse vahel perioodil 1992.-2000. a.

Jooniselt 19 on näha, et perioodil 1992.-2000. a maapinna liikumise ja põhjavee taseme muutuse vahel seost ei esine. Samuti puudub seos sel perioodil toimunud maapinna liikumise ja savikihi paksuse vahel (Joonis 20).



Joonis 20. Korrelatsioon maapinna liikumise perioodil 1992.-2000. a ja savikihi paksuse

vahel.

5. Arutelu

Töös kasutatud reeperite liikumiste andmestik võimaldab tuvastada maakoore ülemise 30 m piires toimunud pinnase mahu muutusi. Glatsioisostaatiline liikumine haarab paksema maakoore osa ja seetõttu need liikumised kasutatud andmestikus ei kajastu. Pärnust umbes 7 km kaugusel Audrus asuva GPS püsijaama andmetel on tõenäoliselt glatsioisostaatilise päritoluga maapinna tõus 2,9 mm/a (Oja et al., 2012). Teistes töödes on tõusukiiruseks hinnatud kuni 1 mm/a (Rosentau et al., 2012) või 0 mm/a (Puura, 2008), kuid need andmed on antud merepinna suhtes ning merepinna tõus (ca 1,4 mm/a) „varjutab“ seega osaliselt maapinna tõusu (Rosentau et al., 2012).

Klasteranalüüsi tulemusena grupeeriti sarnaselt käituvad reeperid. Nende paiknemiskoha savikihi paksuse ja liikumise iseloomu võrreldes võib paari reeperi näitel tuua seose suurema savikihi paksuse ja vajumise jätkumise vahel. Nimelt näitasid grupis D olevad reeperid (seinareeper nr 246 ja pinnasereeper nr 867) jätkuvat vajumist kogu uuringuperioodil jooksul, vajumid ulatusid 74 cm kuni 110 cm. Savi paksuseks oli nende reeperite asukoha vähemalt 18 m, mis on analüüsitud reeperite asukohtadest suurim.

Vastupidiselt grupi D reeperitele vajusid uuringuperioodi jooksul gruppi C kuuluvad kõige vähem ning näitasid isegi mõningast tõusu (kuni 2 mm) üle 1987. a alguspunkti väärtusest. Suurem osa C-grupi reeperitest asub linna kaguosas, kuhu ei ulatu töös kasutatud põhjavee ega viirsavi kihipaksuse andmestik. Seetõttu on savikihi paksuse andmed seitsmest C-grupi reeperist olemas vaid kahel, mõlemas savi paksus 14 m, ning kasutada polnud ka täpseid veetaseme andmeid reeperite lähistel. Kuna grupi C reeperitest suurem osa asub Reiu veehaardele ülejäänutest lähemal, siis võib maapinna tõusu soodustavaks põhjuseks pidada veetarbimise vähenemisega kaasnenud veetaseme tõusu kiiremat mõju pinnases poorirõhu tõusmisel.

Jõeäärsete pinnasereeperite puhul võrreldi reeperite paaride (jõe ääres ja jõest eemal) liikumisi. Jõe lähemal olevate reeperite kumulatiivne liikumine oli väiksema ulatusega. Kuna suurim liikumiste erinevus jäi perioodi 1987.-1992. a, mis kattub linnas põhjavee taseme minimaalse väärtuse ja peale seda algava veetaseme kiire tõusu ajaga, siis liikumiste

erinevuse põhjuseks võib olla Pärnu jõe poorirõhu muutusi (põhjavee taseme muutusest tingitud) kompenseeriv mõju jõe ümbruses. Kõrgete survetasemete puhul toidab põhjavesi jõge ning madalate puhul hakkab jõgi toitma põhjavett ning seega aitab jõgi säilitada enda vahetus läheduses poorirõhke stabiilsemana. Teistest erinevalt käitus reeper 702, mis vajus perioodi jooksul kõigest reeperitest rohkem (35 mm). Liikumise iseloomu erinevuse põhjuseks võib pidada asjaolu, et reeper 702 asub tööstuskompleksi vahetus läheduses, kus arvatavasti esineb vibratsiooni tööstusmasinate liikumise tõttu. Lisaks asub reeper 702 jõe pörkeveerul, kus jõe pideva erosiooni tõttu on ka aktiivsemad nõlvade liikumised, seda piirkonda on näidatud rohkem liikuvamana ka varasemates uuringutes (Maa-ameti geoportaal; Liblik et al., 1989). Pikajalised, aeglased liikumised nõlvadel (roome) vähendavad pinnase tugevust ning seega on sellised piirkonnad ühed kõige lihkeohtlikumad (Kohv, 2011).

Maapinna liikumise seos põhjavee survetaseme tõusu ja savikihi paksusega perioodi 1992.-2000. a andmete põhjal ei ilmnenu. Põhjuseks võib olla perioodi lühike kestus, sest savikihi filtratsiooniomadused on kehvad ja seetõttu põhjavee taseme mõju võib ilmneda alles pikema aja jooksul. Samuti võib olla tugevam seos kõigi kolme parameetri omavahelises koosmõjus, sest põhjavee taseme tõusu mõju savikihis poorirõhu tõusmisel sõltub arvatavasti savikihi paksusest, nii et õhem savikiht reageerib kiiremini elastse deformatsiooniga veetaseme tõusule (Mets et al., 2000).

Uringuala Pärnu linna pinnasereeperite mõõtmistulemuste analüüsist selgus, et mõnes piirkonnas, näiteks linna kaguosas, maapind on tõusnud paar mm üle uuringuperioodi alguspunkti (1991.-2010. a kuni 3-11 mm). Põhjuseks võib olla savipinnase elastne deformatsioon, mis võib savipinnaste puhul olla kuni 10 % kogudeformatsioonist (Vilo, 1986; Listra & Talviste, 1988²). Näiteks varasemas uurimuses (Liblik et al., 1989; Joonis 8) välja toodud IV piirkond, mis asub Ehitajate tee ja Tallinna mnt ristumiskohast ida pool, toimus vajumine keskmise kiirusega üle 10 mm aastas. Kui elastne deformatsioon moodustab 10 % kogu deformatsioonist, siis peaks vajumine olema asendunud tõusuga ca 1 mm aastas. Perioodi 1992.-2000. a jooksul vastav piirkond (Joonis 18) tõusis 7-8 mm. Seega justkui savipinnase kohta elastse deformatsiooni ulatuse teooria kehtiks. Vastupidise näitena kesklinnas asuvas piirkonnas III (Joonis 8) toimus maapinna vajumine ka põhjavee tõusuperioodil 1992.-2000. a (Joonis 18), mille põhjuseks võib olla kesklinna alal suur täitepinnase paksus, mis iseenesest põhjustab savikihi kompaktiooni jätkumist.

Kuna Pärnus piires on savikihi paksus muutlik ja tõenäoliselt sõltub põhjavee taseme tõusu järgne poorirõhu suurenemise mõju savikihi paksusest (Mets et al., 2000), siis saab eraldada erinevad piirkonnad, kus maapinna vertikaalliikumise iseloom on seotud nii põhjaveetaseme muutuste kui ka savikihi paksusega. See seos ilmneb arvatavasti uurimisperioodist pikema perioodi võrdluses, sest savikihi filtratsiooniomadused pärsivad poorirõhu tõusu savikihis tervikuna (Coduto, 1998).

Võimalikud edasiarendusena korrelatsiooni leidmine pikema perioodi kohta maapinna liikumise, veetasemete ja savipaksuse vahel. Tegelik olukord pole üheselt analüüsiv, sest puudub täpne andmestik iga mõõtepunkti tingimuste kohta. Tegelikult põhjavee taseme taastumine toimus eri piirkondades erineva tempoga ja lisaks suleti paiguti väiksemaid veevõtu kohti tööstuskomplekside juures (näiteks Joonisel 17, Liikumised Pärnu linnas) linna põhjaosas välja eralduv vajumispiirkond. See piirkonnas võivad olla ettevõtete lokaalsed puurkaevud, mis avaldavad lokaalset mõju veetaseme muutusele. Seega tuleks hetkel käimasoleva Pärnu veetaseme seire kavandamisel arvestada ka käesoleva töö tulemusena saadud maapinna liikumiste kaarti, kuna see võib peegeldada ka erinevusi põhjaveetasemete muutuses. Praegusest analüüsist jäid välja ka mõned potentsiaalselt liikumisi mõjutavad tegurid: viirsavil lasuva liiva- ja täitekihi paksus; võimalikud lokaalsed depressioonilehtrid, mida suhteliselt hõre põhjaveeseire ei „näe“; aegsõltuvus poorirõhkude muutumise ning viirsavi veeliste omaduste ja paksuse vahel, mistõttu tekivad viivitused maapinnaliikumistest võrreldes põhjaveetasemete muutusega. Osaliselt arvestati töös maanteed ja jõe mõjuga ja suurte majade lokaalvajumistega. Omaette probleem on SAR andmestiku filtreerimisvõimalused, et saada kontrollimatust PSI parvest kätte just maapinna liikumised ja eraldada välja näiteks konstruktsioonilised vajumised. Siin võiks abiks olla Google Street View, kuid üksikhaaval PSI-de käsitsi andmehulgast eemaldamine on väga töömahukas protsess.

Vajalik on jätkata maapinna liikumise seiret kordusnivelleerimise teel ja uuendusliku võimalusena satelliitseirega ning välja arendada satelliitseire andmestiku töötlemise viis, mille abil saaks jälgida nii Pärnu linnas kui ka Eesti teistes piirkondades lokaalseid maapinna liikumise anomaaliaid ja üldliikumise iseloomu.

Edasiste tegevustena vajalik uuendada põhjavee seiresüsteemi, sest surveiline veetase mõjutab maalihkeohtu ning maapinna vajumisi. Käesolevas töös välja joonistuvad vajumis- ja

kerkimisalad (joonis 18) on potentsiaalsed asukohad hetkel uuendatavale Pärnu survealise põhjaveekihi seiresüsteemile. Samuti vajalik jätkata läbimõeldult geodeedilise kontrolliga ja pikendada InSar aegridasid kuni 2010 ning analüüsida täiendavaid võimalusi andmete puhastamiseks (Google Streetview, hoonete pindala ja seisukord jne).

Kokkuvõte ja järeldused

Käesoleva magistr töö eesmärk oli kirjeldada ja analüüsida Pärnu linnas maapinna vertikaalliikumise iseloomu perioodil 1988-2010. a põhjavee taseme muutuste taustal ning võrrelda maapinna liikumise iseloomu varasema perioodiga (1960-1988. a) erinevates põhjavee taseme tingimustes. Lisaks selgitada maapinna liikumise iseloomu põhjuseid arvestades uuringualaks oleva Pärnu linna geoloogilises ehituses muutuva savikompleksi paksusega ja uuendusliku aspektina katsetada Eestis satelliitseire (InSar) mõõtmisandmestiku kasutamist Pärnu linnas maapinna vertikaalliikumiste iseloomustamiseks.

Käesoleva tööga püstitatud eesmärkide saavutamiseks kasutati linnas hajusalt paiknevate geodeetiliste reeperite kõrgusandmete kumulatiivseid aegridasid perioodi 1987.-2010. a kohta, jõeäärsete reeperite puhul olid andmed 1987.-2004. a kohta ning satelliitseire andmestik perioodi 1993-2000. a kohta. Lisaks kasutati töös Pärnu linna geoloogiliste puuraukude andmeid viirsavi kihipaksuse kohta ja põhjavee survetaseme muutuste andmeid perioodil 1992.-2000. a.

1. Kuni 1992.-1993. aastani jätkus Pärnu linnas uuringuperioodile eelnenud perioodiga sarnaselt maapinna vajumine
2. 1993.-2010. a põhjavee survetase tõusis ja sellega kaasnes vajumiste aeglustumine ning asendumine tõusuga.
3. Maapinna tõus on arvatavasti tingitud pinnase elastsest deformatsioonist, mis savides võib olla kuni 10% esialgselt deformatsioonist.
4. Selget korrelatsiooni regressiivse mudeli abil maapinna liikumise ja põhjavee survetaseme muutuse ega maapinna liikumise ja savikihi paksuse vahel ei ilmnenud. Arvatavasti peaks selliste seoste leidmisel arvestama ka savikihti katva liivakihi paksusega ning samuti savikihi paksusest sõltuva põhjavee survetaseme muutuse mõjuga.
5. Jõeäärsed reeperid – jõe lähemal asuvad reeperid liikusid (vajusid) uuringuperioodi esimeses osas, aastatel 1987.-1992. a, vähem kui jões kaugemal asuvad reeperid. Arvatav põhjus on jõevee taseme tasakaalustav mõju pinnases poorirõhu langusele ja sellest tingitud maapinna vajumisele põhjavee taseme miinimumi perioodil 1988.-1989. a.
6. Üksteisele lähedal (23-75 m kaugusel) paiknevad PSI-d ja reeperite liikumise iseloom

võrreldud punktide käitumise järgi mõõtmisandmestiku kattaval perioodil 1992.-2000. a oli sarnane. Erinevalt käitunud puhul mängis rolli asukoht, mis ühel juhul oli näiteks tööstuskompleksi ja teadaoleva Pärnu jõe lihkeotliku kaldapiirkonna lähedus.

7. Käesolevas töös välja joonistuvad vajumis- ja kerkimisalad on potentsiaalsed asukohad hetkel uuendatavale Pärnu survealise põhjaveekihi seiresüsteemile.

Tänuõnad

Autori poolt läheb suurim tänu juhendajale Marko Kohvile igakülgse abi, kannatlikkuse ning meeldiva koostöö eest käesoleva töö valmimisel. Suur tänu läheb ka Tarmo Allile, kes jagas töö autoriga Pärnu linnas satelliitseirega mõõdetud maapinna liikumiste algandmestikku.

Samuti tänab autor Peeter Talvistet ja Annette Sedmanit kasulike nõuannete ja soovitude eest ning oma õde Kerstit ja venda Tarmot, kes olid abiks mitmete jooniste kujundamisel.

Kasutatud kirjandus

- All, T., Karimov, M., 2008. Ground Motion Monitoring of the City of Pärnu (Southwestern Estonia) by PS InSAR. Initial Interpretation Report. Tallinn, 24. Käsikiri Eesti Geoloogiakeskuse OÜ-s.
- Boldõreva, N., 2003. Põhjavee seisund 1999.-2003. aastal. Pärnu seirepiirkond. Tallinn: Eesti Geoloogiakeskus, Hüdrogeoloogia osakond. 50-53.
- Castañeda, C., Gutiérrez, F., Manuta, M., Galve, J., P., 2009. DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1562-1574.
- Coduto, D. P., 1998. *Geotechnical engineering: principles and practices*. Upper Saddle River, New Jersey, 747.
- Davis, J., C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York.
- Eesti ilma riskid. Toim. A. Kallis. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut, Tallinn, Tallinna Raamatutrükikoda, 2008.
- Ellmann, A., Oja, T., 2008. Füüsikalise geodeesia ja gravimeetria alused, Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 296 lk.
- Hang, T., Kalm, V., Tuuling, I., 2008. Pinnamood ja selle kujunemine. Pärnumaa I. Loodus. Aeg. Inimene. Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn, 74-92.
- Hongdong, F., Kazhong, D., Chengyu, J., Chuanguang, Z., Jiqun, X., 2011. Land subsidence monitoring by D-InSAR technique. *Mining Science and Technology (China)*, 21, 869-872.
- Jüriado, K., Petersell, V., Raukas, A., 2011. Radon emissions in Harju Country, North Estonia. *Estonian Journal of Ecology*, 60 (4), 305-320.
- Karila, K., Karjalainen, M., Juha Hyypä, J., 2005. Urban land subsidence studies in Finland using synthetic aperture radar images and coherent targets. *The Photogrammetric Journal of Finland*, volume 19, number 2, 43-53.
- Kakko, M., Kärk, J., 2004. Pärnu jõekallaste geotehniline kontroll. Aruanne, käsikiri Pärnu Linnavalitsuse planeerimisosakonna arhiivis.
- Kase, U., 2008. Geograafilised iseärasused. Pärnumaa I. Loodus. Aeg. Inimene. Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn, 19-21.
- Keller, E., A., DeVecchio, D., E. *Natural Hazards*. 3rd ed. New Jersey: Pearson Education, 2012.

- Kohv, M., 2011. Landslides in clayey soils of western Estonia. The Thesis. Tartu University Press. Tartu.
- Liblik, T., Listra, H., Talviste, P., 1989. Uued vundeerimissuunad Pärnus. Eesti ehitusgeoloogia andmekogu aruanne nr 26633.
- Liblik, V., Toomik, A., Rätsep, A., 2005. Suletud ja suletavate kaevanduste keskkonnamõju. TLÜ Ökoloogia Instituut Publikatsioonid 9/2005 (Keskkond ja põlevkivi kaevandamise Kirde-Eestis), Tallinn.
- Listra, E., Talviste, P., 1988¹. Geotehniline kontroll nõrkade savipinnaste ja moreenpinnaste levialal, I köide. Vajumisvaatlused Pärnus. Aruanne nr 3499 X (Eesti ehitusgeoloogia andmekogu aruanne).
- Listra, E., Talviste, P., 1988². Tihenemise eelsurve olemus, kujunemine ja inseneriarvutustes kasutamise võimalused. Eesti geotehnika konverents: IX Eesti geotehnika konv. Teesid. Tallinn. 33-34.
- Lokotar, A., 2005. Tartu vanalinna hoonete vajumine ja selle geoloogilis-hüdrogeoloogilised põhjused. Ülemastmetöö rakendusgeoloogias, juhendaja V. Kalm, käsikiri Tartu Ülikooli Geoloogia Instituudis.
- López-Quiros, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P., Nicolas, J.-M., 2009. Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69, 1-15.
- Mets, M., Torn, H., Saapar, L., 2000. Perspectives and Problems of Geotechnical Monitoring in Estonia. IX Balti Geotehnika konverents, artiklid, 226-233.
- Oja, T., Pihlak, P., Kollo, K., Rüdja, A., 2012. Determining the Post-Glacial Rebound in Estonian from GNSS Observations. Konverentsi poster, Slalom 2012.
- Ojamäe, M., 2010. Tallinna kesklinna piirkonna reeperite vajumine 2002 ja 2008 nivelleerimisandmete põhjal. Magistritöö, käsikiri EMÜ Metsandus- ja maaehitusinstituudis, 80 lk.
- Olli, V., 1962. Eesti NSV pinnastest. Ehitusgeoloogia kogumik I. Tallinn, 14-22.
- Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D., L., Cherry, J., A., 1999. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, vol 35, no 11, 3327-3341.
- Prati, C., Ferretti, A., Perissin, D., 2010. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics*, 49, 161-170.

- Puura, V., 2008. Tektoonika ja aluskord. Pärnumaa I. Loodus. Aeg. Inimene. Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn, 28-37.
- Rosentau, A., Veski, S., Kriiska, A., Aunap, R., Vassiljev, J., Saarse, L., Hang, T., Heinsalu, A., Oja, T. 2011. Palaeogeographic Model for the SW Estonian Coastal Zone of the Baltic Sea. The Baltic Sea Basin, 165-188.
- Saavik, M., Saapar, L., 1998. Pärnu II klassi nivelleerimistöde teostamine sügavreeprite püsivuse määramiseks. Töö nr TP-0017, aruanne, käsikiri Pärnu Linnavalituse planeerimisosakonna arhiivis.
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Tosi, L., Bitelli, G., Spreckels, V., 2009. Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 67, 11, 1261-1270.
- Tosi, L., Teatini, P., Carbognin, L., Brancolini, G., 2009. Using high resolution data to reveal depth-dependant mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy. Tectonophysics, 474, 271-284.
- Talviste, H., 2012. Vajumisvaatlused. Pärnu linna vajumisreeprite kordusnivelleerimine. Töö nr VV-050/12. Aruanne, käsikiri Pärnu Linnavalituse planeerimisosakonna arhiivis.
- Talviste, P., Hang, T., Kohv, M., 2012. Glacial varves at the distal slope of Pandivere-Neva ice-recessional formations in western Estonia. Bulletin of the Geological Society of Finland, Vol. 84, 7-19.
- Toomik, A., 1999. Allmaakaevandamise mõjud maapinnale ja nende hindamine. Tallinna Pedagoogikaülikooli Ökoloogia Instituudi publikatsioonid. Põlevkivi kaevandamise ja töötlemise keskkonnamõjud Kirde-Eestis, 6, 109-129. Tallinn.
- Vilo, A., 1962. Pärnu viirsavide geotehnilistest omadustest. Ehitusgeoloogia kogumik, 1, 98-119.
- Vilo, A., 1976. Ehitiste vajumine nõrkadel savipinnastel. Ehitusgeoloogia kogumik, 3, 76-84.
- Vilo, A., 1986. Ehitusgeoloogia. Tartu Riiklik Ülikool, 110 lk.

Viidatud internetilehed:

Exceli lisamoodul Multibase <http://www.numericaldynamics.com/> (10.05.2013)

Google Street View <https://maps.google.ee/> (19.05.2013)

Maa-ameti geoportaal <http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis> (16.05.2013)

Summary

Ground surface vertical movements on the territory of Pärnu in 1987-2010

Pärnu town is situated in South-West Estonia, on the shores of the Pärnu bay. The town lies on relatively thick compressible varved clay layer. Ground subsidence has been noticed as a problem since 1960-s in the area. Geodetic levelling data has indicated local sinking in several places over the town. The main causes are human-induced changes in the groundwater regime combined with geological conditions (soft glaciolacustrine varved clay layer).

The underlying artesian groundwater level decreased in 1960–1989 with maximum speed of 1 m in year reaching the minimum level of 12 m below sea level. This decrease was caused by intensive ground water consumption. The ground water withdrawal was accompanied by intensive sediments compression that was expressed as ground subsidence. Since 1990's the consumption of ground water decreased rapidly, the groundwater depression refilled and stabilized around the 0 m a.s.l.

The purpose of the study was to investigate the vertical ground movements in 1987-2010 using geodetic levelling and inSar (Interferometric Synthetic Aperture Radar) measurements. The results were compared with ground water level and clay thickness data to find correlations between ground movements, ground water level changes and varved clay thickness. Also applicability of SAR data in ground movement studied in Pärnu area was preliminary evaluated.

The main results of the study were:

1. Ground subsidence continued to 1992-1993 in same rates as noted from previous studies
2. Since 1990's ground water level rise rapidly, consequently subsidence slowed down and turned to smaller uplift.
3. Ground level uplift is probably caused by elastic deformation of clay layer which may be up to 10% of deformation.
4. In period 1992-2000 there was no good correlation between ground movement and ground water level change. The same conclusion applies to ground movement and clay thickness correlation.

5. The benchmarks nearer to the Pärnu River showed smaller movement in 1987-1992 than benchmarks away from the river. The cause may be the stabilizing effect of the river as the pore water pressures were maintained in clay layer close to river channel due to additional recharge from the Pärnu River.
6. Comparison of the inSar and geodetic levelling reveal generally good agreement but points to the importance of the filtering of the inSar data points.

20.05.2013

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina Margit Miller, (sünnikuupäev: 07.07.1984)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose,

Maapinna vertikaalliikumise iseloom Pärnu linnas perioodil 1987–2010 põhjavee survetaseme muutuste taustal,

mille juhendaja on Marko Kohv,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 20.05.2013