



Tüüpkatendite ja tüüpkaevukonstruktsioonide kasutamise analüüs
Tallinna teede-tänavate ehitamisel ja remontimisel. Muudatuste ja
täienduste väljatöötamine tehnoloogiliste lahenduste uuendamiseks.

Tallinn 2018

Sisukord

Kasutatud lühendid ja sisuseletus	4
Eessõna – uuringu eesmärk.....	5
1. Tüüpkatendid, kandevõime mõõtmine ja tsementbetoonkatendid	6
1.1. Eessõna ja Kokkuvõte	6
1.2. Sissejuhatus	7
1.2.1. Tüüpkatendi alus ja rakendatavus.....	7
1.3. Mõõtevahendid	8
1.4. Eritingimused.....	13
1.4.1. Kontrollitav parameeter ja mõõtetitingimused.....	13
1.4.2. Saksa seadmed ja mõõtetulemuste omavahelised seosed	16
1.4.3. Inglise normid ja mõõtmiste süsteem	17
1.5. Odemarki valem ja katendikonstruktsiooni kandevõime	18
1.6. Teekatendi konstrueerimisest ja materjalidest.....	21
1.7. Kergseadmete kasutusvõimalus kvaliteedikontrollis	25
1.8. Kandevõime mõõtmise juhendid	28
2. Tsementbetoonkatendid (betoontee, bussipeatused)	31
2.1. Teekatendi aluskonstruktsiooni turbeteguri (sängitusmooduli) K määramine	31
2.2. Betoonkatte arvutus (näidis).....	33
2.3. Betoonkatendite variandid. Paldiski mnt katselõik.....	35
2.4. Tsementbetoonkatendi dimensioneerimise täpsustamine	37
2.5. Tsementbetoonkatendites kasutatava betooni seguretseptide täiendamine.....	38
2.5.1. Alkali-silica reaktsioon	38
2.5.2. Tsementbetoon. Tsement ja täitematerjalid.	43
2.6. Vuugid betoonkattes	44
3. Tüüpkaevukonstruktsioonid.....	45
3.1. Eessõna ja Kokkuvõte	45
3.2. Kaevukonstruktsioonide ehitamine katseobjektidel ja nende ekspluatatsioon	48
3.2.1. Ehitajate tee	48
3.2.2. Suur-Sõjamäe tn	49
3.2.3. Kotka tn	51
3.2.4. Hiiu tn	52
3.2.5. Punane tn	53
3.2.6. Tammsaare tee.....	53
3.3. Tüüpkaevukonstruktsioonide luugikorpu komplektid ja nende kasutamine.....	55
3.4. Tehnovõrkude kaevupäiste defektid.....	60

3.5.	Kaped A1, B2, C3 koormusklassi tänavatel-teeudel	64
3.6.	Sademevee restkaevuluugid	64
3.7.	Luugikomplekti kontaktpinnad.....	67
3.8.	Kaevupäised sõiduteel. Põhinõuded	69
3.9.	Koormusjaotusplaat ja luugikorpus.....	69
4.	Kasutatud kirjandus.....	75
4.1.	Normid, standardid, katsemeetodid	75
4.2.	Teaduslik-tehnilised uuringud	76
4.3.	Kasutatud juhised	77

Kasutatud lühendid ja sisuseletus

- APAS - Soome VTT poolt koostatud katendiarvutustarkvara
- ASR – alcali-silica reaction – tsemendi ja kivimaterjali vaheline reaktsioon, mis võib moodustada geeli hüdraulilise sideainega kihis ja seeläbi kihi kiire lagunemise
- BASt - Bundesanstalt des Straßenwesen – Saksa Maanteeamet
- CBR - California Bearing Ratio, suhteline kandevõimenäitaja, etaloniks ehk 100% väärtuseks on California lubjakivikillustiku kandevõime (elastsusmoodul)
- DIN – Deutsche IndustrieNorme – Saksa standard
- Dynatest, KUAB – seadmetootjad (kaubamärgid)
- E_d - FWD – ga määratud E-moodul
- E_{vd} – LWD – ga määratud E-moodul
- EVS – Eesti Vabariigi Standard
- E_{vaj} – katendiarvutuses või normdokumendis sätestatud minimaalselt vajalik kandevõime
- E_{v1} , E_{v2} – plaatkoormuskatsega mõõdetud kandevõime väärtus vastavalt esimesel või teisel koormamisel
- FWD – Falling Weight Deflectometer – kandevõime mõõteseade, mis imiteerib maanteekiirusel liikuvat raskeveokit
- GDP – German Dynamic Plate – LWD Saksa koolkonna seadmete üldnimetus
- InfraRYL – Soome juhised infraehituse tööde kohta, ka MaaRYL (üldehitustööde osa)
- Inspector – Englo OÜ toodetav pinnase elastsusmooduli tester (tihenduskontrolli seade)
- KAP – Katendi Arvutuse Programm (Excel-rakendus katendite kontrollarvutuseks)
- kape – tehnovõrgu siibri/ventiili spindli ühenduskoha (kaevu) päis
- korebetoon – jämeda struktuuriga betoon, kus puudub peentäitematerjal
- Loadman – AL Engineering (Soome) poolt toodetav pinnase elastsusmooduli tester (tihenduskontrolli seade)
- LWD – Lightweight Deflectometer – kandevõime mõõtmise kergseade
- MKM – Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium
- PJCP – Plain Jointed Concrete Pavement
- PLT – Plate Load Test (plaatkoormuskatse)
- RStO – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen – Saksa juhised teede ja tänavate katendite standardlahenduste kohta (tüüpkatendid)
- RWD – rolling weight deflectometer – maanteekiirusel mõõtev kandevõime mõõteseade
- TSD – traffic speed deflectometer (RWD on üldtermin)

Eessõna – uuringu eesmärk

Uurimistöö eesmärk on analüüsida Tallinnas teede ja tänavate katendikonstruktsioonide ja tehnovõrkude kaevukonstruktsioonide tüüplahenduste rakendamist (vastavad juhendid võeti kasutusele Tallinna Linnavalitsuse istungi protokollis 27.aprill 2016.a nr17 pp35 alusel). Töötada välja ettepanekud juhenditesse vajalike muudatuste ja täienduste sisseviimiseks ja tehnoloogiliste lahenduste uuendamiseks.

Lähteülesandest:

1. Asfaltbetoonkatendite kandevõime E_{vaj} võrdlus erinevate arvutusmeetodite ja FWD katsete alusel.
2. Katendites kasutatavate ehitusmaterjalide E-moodulite süsteemi täiendamine.
3. Plaatkoormuskatsete meetodika täiustamine (E_{v0} ; E_{v1} ; E_{v2}). Korrelatsiooniline seos Inspectori, Dynatest LWD ja FWD katsete tulemustega.
4. Kergliiklustee tüüpkatendi konstruktsioon.
5. Asfaltbetoonsegude nõuete täiendamine (bituumen, jämematerjal jt). Meetmed kulumiskindluse tõstmiseks (nt metallurgiatööstuse šlakk-jääkaine kasutamine).
6. Tsementbetoon seguresepti täiendamine ja nõuete täpsustamine. Tsement CEM II 42,5 või CEM I 42,5 (Kunda Nordic) kasutamine.
7. Tehnovõrkude kaevukonstruktsioonis kasutatava koormusjaotusplaadi mõju teekonstruktsiooni deformatsioonidele ja tehnoloogilise lahenduse uuendamine. Katseobjektid: Ehitajate tee, Punane tn, Smuuli tee - Suur-Sõjamäe ristmik, Hiiu tn, Tammsaare tee.
8. Kaevupäise luugikomplekti uuendatud konstruktsiooni analüüs. Täpsustatud nõuded malmile ja kaevupäise malmosade vahelistele tolerantsidele. Vergumix (või analoogse) tehnoloogia kasutamine ehitamisel ja remondil (sh garantiiremondil).

Analüüs koosneb kahest suuremast osast, millest esimene käsitleb tüüpkatendeid ja kandevõime mõõtmist ning betoonkatenditega seonduvat ja teine osa kaevukonstruktsioone. Detailsemalt on täiendused ja muudatused kajastatud peatüki alguses.

Töö koostajaks on T-Konsult OÜ, vastutav koostaja – volitatud teedeinsener Ain Kendra.

Liiklussageduse ja koormussageduse kasv Tallinna teedel ja tänavatel on tinginud vajaduse suurendada teede ja tänavate eluiga, ja remondivahemikke. Linnatingimustes ei ole katendite projekteerimiseks vajalikud algandmed sageli samas täpsusklassis maanteedega, kuid erinevusi arvestav reglement on seni puudunud. 2009-2013 linna ja Maanteeameti tellitud uuringud on loonud aluse, mille baasil on Tallinna linn valinud suunaks tüüpkatendite kasutuse. Makromajanduslikult on põhjendatud kohalike ehitusmaterjalide (tsement, killustik, liiv, kaevanduslikud aherained jne.) laialdasem kasutamine. Tsementbetoonkattega teed-tänavad aga ka hüdraulilise sideaine laialdasem kasutus teekonstruktsioonide alakihtides pakuvad strateegilist lahendust nendele küsimustele. Tallinnas alustati 2013. a. programmi tsementbetoonkatendite rajamise kompetentsi loomiseks. Alates 2013. aastast on Tallinnas rajatud üle 25 tsementbetoonkattega ühistranspordipeatuse, katsetatud on nii otseselt tsementbetoonist ülakihiga kui ka asfaldist kulumiskihiga betoonkatteid. 2016. a. suvel valmis betoonkatendiga katselõik Paldiski maanteel. Rakendatud on nende ehitiste seireprogramm hindamaks eksploatatsioonilist seisundit. Kogutud andmete alusel on võimalik hinnata kasutatud projektlahenduste ja ehitustehnoloogiate sobivust ning täiendada ja parandada kehtivat juhendit. Tööd juhendi kaasajastamiseks on kavas jätkata regulaarselt.

1. Tüüpkatendid, kandevõime mõõtmine ja tsementbetoonkatendid

1.1. Eessõna ja Kokkuvõte

Tallinna tüüpkatendite juhise korrektuuri vajadus tulenes nii praktilistest kogemustest kui tehnilistest arengutest sektoris:

Tüüpkatendite ja kandevõime osas on käsitletud katendiarvutust, kandevõime mõõteseadmeid ja mõõtmiskorraldust ning nõudeid materjalidele ja on jõutud järeldustele:

1. linnas praktiliselt ei kasutata mustkillustikku, rahaliselt ei anna MUK võrreldes AC base kasutusega aluse ülakihis ehk katte alakihis olulist säästu ja sisaldab riski ehitusaegse liikluse tõttu kihi seotuse kaotamiseks (manööverdav veok võib seotud materjali taandada sidumata seguks, mustkillustikul ei tohiks lubada ehitusaegset liiklust või avada seda liiklusele), seega pole seda vaja ka tüüpkatendis hoida – samas ei ole ka MUK kasutus keelatud;
2. kasutusele on võetud tehases segatud tsementstabiliseeritud kiht mis annab aluse ka edasiseks hüdraulilise sideaine laiemaks kasutuseks linnatänavate katendikonstruktsioonides (paigaldamine on lihtsam ka olukorras kus aluses esinevad kaevud ja kaped);
3. lisatud on võimalus metallurgiašlakist toodetud raske killustiku (OKTO) kasutamiseks asfaldi kulumiskihis (nõuded ei ole üheses vastavuses Maanteeameti juhistes sätestatuga);
4. täpsustatud on nõuded asfaltbetoonile betoonkonstruktsiooni kulumiskihis
5. teostatud kontrollarvutused ja täpsustatud nõutavaid kandevõime väärtusi ehituse kvaliteedikontrolli protsessis (plaatkoormuskatse);
6. riikliku tellimuse puudumisel on TTÜ (TalTech) magistritööde tasemel uuritud ja võrreldud erinevate mõõteseadmete kasutusvõimalusi ja piiranguid, siit tulenevalt on Juhisesse lisatud Taani koolkonna LWD kasutusvõimalus koos süsteemse lähenemisega nõutud kandevõime tähendusele (Inglise praktika - libisev keskmine ja miinimumtase);

Töös on kirjeldatud ka edased uuringusuunad, millega on kavas täpsustada seoseid ja parandada erinevate seadmetega mõõdetavate tulemuste ühilduvust katendite dimensioneerimisel arvatud tulemustega. On ilmnenu vajadus uue juhendi koostamiseks sillutiskatete projekteerimiseks ja ehitamiseks tulenevalt uuendatud InfraRYL kogumikus esitatud põhimõtetest, teema detailsem käsitlus ei mahu käesoleva töö raamesse ei ajaliselt ega mahuliselt.

Tsementbetoonkatendite osas on käsitletud aluskonstruktsiooni kandevõimet (turbetegur K), täpsustatud dimensioneerimismetoodikat Paldiski mnt katselõigu temperatuurigradientide tulemuste baasil ja täiustatud betooni seguretsepti ning esitatud põlevkivi kiirtsemendi kasutustingimused. Betoonkatte kulumiskiiruse esialgsed näitajad Sõle ühistranspordipeatuses ja Paldiski mnt katselõigul 0,17 mm/a ja 0,27 mm/1000 AKÖL. Järeldused saab lühidalt kokku võtta:

1. Tsementbetoonkatendite suurema jäikuse tõttu saab kasutada ca 20 % madalama kandevõimega aluskonstruktsiooni võrreldes asfaltbetoonkatendiga. Aluskonstruktsioonis tuleb kasutada eelkõige tsementstabiliseeritud kivimaterjali (uus killustik või olemasoleva teekonstruktsiooni freesitud materjal) või korebetooni.
2. Tsementbetooni seguretsepti koostamisel tuleb teostada eelkatsena täitematerjali ja tsemendi vahelise leelis-räni reaktiivsuse määramine. CEM II/B-T-42,5N kasutamine on võimalik aga valitud jämetäitematerjali ja tsemendi vaheline leelis-räni reaktiivsuse näitaja peab olema lubatud piirides $ASR < 0,10 \% 14d$.

3. Tsementbetoonkatte kulumiskindluse tõstmiseks kasutada suurema läbimõõduga jämetäitematerjale kusjuures D_{max} 4mm ja D_{max} 32mm vahekord oleks 30/70 %.
4. Temperatuurigradientide esinemistõenäosus Tallinna piirkonnas:
 - $dt > 0,04$ °C/mm 20 %
 - $dt > 0,06$ °C/mm 5 %
5. Betoonkatte võib projekteerida ja ehitada vanale asfaltkattele (nn. whitetopping).

1.2. Sissejuhatus

Tallinna tüüpkatendite eeskujuks on Saksa (RStO 12) ja Soome (InfraRYL) katendite tüüplahendused. Mõlemal juhul on juhendis esitatud kandevõime väärtused, mida peaks olema võimalik kontrollida ehitusprotsessis, üldjuhul plaatkoormuskatsega (DIN 18134:2004, EVS 934:2016). InfraRYL (2017) esitab erinevates koormusklassides konstruktsioonid kõigile erinevatele aluspinnastele ning need tulemused on välja arvatud Odemarki valemiga, kasutades juhises (InfraRYL) kirjeldatud alusparameetreid (erinevate aluspinnaste kandevõime väärtused ja materjalide elastsusmoodulite väärtused). Need numbrid on osutunud mõnevõrra madalamaks mõõtmiste teel saadust (ehk tagasiarvutatud tulemustest) mis viitab asjaolule, et juhendis valitud väärtused peaksid kehtima ka kõige halvemate tingimuste puhul. Siit tulenevalt ei saa ka ehitusprotsessi kvaliteedikontrollis mõõtmistulemuste järgi esinevat suuremat varu automaatselt käsitleda üledimensioneerimisena.

Maanteeameti tellimisel on Teede Tehnokeskus uurinud plaatkoormuskatse rakendamise esimesi tulemusi (2017 mõõtmised) ja jõudnud järeldustele, et nõuded ja tegelikkus ei haaku (vaid 17% juhtumitest vastas tulemus kõigile sätestatud nõuetele). Põhjus on osaliselt mõõtjate kvalifikatsioonis ja detailsete nõuete määratlematuses mõõteprotsessile, osaliselt ka asjaolus, et nõuded tuleb diferentseerida. Tihendusteguri osas võivad esineda ühtlustatud nõuded kuid kandevõime nõue on erinevate koormuste jaoks siiski erinev.

Saksa süsteemis eeldatakse, et aluspinnase ehk muldkeha kandevõime (E_{v2}) on vähemalt 45 MPa ning erinevate aluspinnaste juhtumeid käsitletakse eraldi, eelnevalt kas aluspinnase stabiliseerimise (tugevdamise), asendamise või piisava tugevusega kohalikest materjalidest muldkeha rajamise teel nii, et 45 MPa nõue oleks tagatud, aluspinnase kandevõime tagamine ei ole katendi projekti teema. Saksa süsteemis kirjeldatud kandevõime väärtuste osas on BAST töötajad (eravestlustes ja meilivahetustes) kinnitanud, et need ei tugine arvutustel vaid tegemist on kogemuslike, kokkuleppeliste väärtustega (mida tõestab ka käesolevas dokumendis toodud arvutus).

1.2.1. Tüüpkatendi alus ja rakendatavus

Tüüpkatendi liigituse aluseks on otseselt võttes liiklussagedus, kaudselt koormussagedus, analoogiliselt InfraRYL jaotusega. Koormussagedus avaldatakse standardtelgedes ning tegelik liiklus teisendatakse siirde- ja rajateguritega koormuseks enamkoormatud sõidurajale.

Tüüplahenduste kasutajate tähelepanu tuleks juhtida Linnatänavate standardi EVS 843:2016 tabelis 4.1 toodud asulate liigitusele. Võib öelda, et III ja IV klassi linnades (alla 50,000 elaniku) ei esine põhimagistraale ja asumi peatänav liigitub jaotusmagistraaliks. Kui transiitliiklus on asumist mööda juhitud, võib ka asumi peatänavat lugeda liigituses kohalikuks jaotustänavaks. Eelkõige tuleks arvestada liikluse iseloomu – kui valdavaks on ligipääs maakasutusele, ei ole tegemist magistraaliga.

Linnatänavate standardi tabelis 6.18 toodud katendi kandevõime miinimumväärtused kehtivad arvutusteks programmiga KAP, tuginedes seejuures 10-tonnise paarisratastega (rehvirõhk 0,6 MPa)

varustatud standardtelje läbikutele. Kuna KAP arvatud kandevõime väärtused ei ole võrreldavad reaalselt mõõdetavate numbritega, siis on käesolevas tüüpkatendite dokumendis toodud kandevõime väärtused, mis peaksid olema kontrollitavad plaatkoormuskatse seadmega või kerge deflektomeetriga (LWD). Siit tulenevalt võib ka öelda, et MKM määruses nr 101¹ (kvaliteedinõuded) toodud kontrollarvud Inspector/Loadman seadmetele ei ole adekvaatsed tüüpkatendite kasutuses, kuna Soome koolkonna LWD seadmed on ette nähtud tihendusteguri kontrolliks, mitte kandevõime kontrolliks ja seadme esitatud kandevõime väärtus kajastab pigem konkreetse kihi elastsusmoodulit ebaloomulikult kõrge pinge juures.

Tüüpkatendite valik tugineb liiklussagedusel ja juhul, kui konkreetse tänava osas loendusinfo puudub, kasutatakse liiklusemudeleid (Tallinna ja teiste suuremate linnade kohta on neid koostatud). Mudelis on tavaliselt antud tiptunni liiklussagedused eraldi suundade kohta. Ööpäevase liikluse mahust moodustab tiptund reeglina 8-15%. Väiksemate asumite puhul on abiks riigiteede liiklusloenduse andmed. Et katendi dimensioneerimise aluseks on tegelikult raskeliiklus, siis kajastab riigiteede info üsna hästi ka asumit läbivat raskeliiklust (väiksem asum ei genereeri olulist raskeliiklust, suuremates asumites esineb muuhulgas linnasisene ühistransport, mis mõjutab ka koormussagedust). Kuigi Maanteeameti juhises räägitakse ka liikluse käsiloendusest kui koormussageduse määramise viisist, siis usaldusväärsemad tulemused saame pikaajaliste automaatloenduste tulemusel (vähemalt nädalane loendus) ka üldistatud sõidukiliigitust kasutades. Linnaliikluses on adekvaatse koormussageduse leidmine oluliselt ebatäpsem kui maanteel, nädalase loenduse läbiviimine ei ole reaalselt võimalik ja lühema ajavahe baasil leitud koormused ei kajasta tegelikku olukorda. Ka on prognoosid sõltuvad võimalikest kohalikest arengutest, mistõttu on paljudes riikides üle mindud liiklussageduse põhisele tüüplahendustele. Tõsi, reaalselt võib vahet teha sama liiklussagedusega tänavate erinevas liikluskoosluses, mistõttu on kokkuleppel tellijaga (tänavamaa haldajaga) võimalik kasutada ühe klassi võrra suurema või väiksema koormuse katendit.

Reeglina on valitud tüüpkatendi nõuded suurema koormusega teedele rangemad kui maanteejuhiste järgi dimensioneeritud katendil, üheks põhjuseks on madalam kiirus ja staatiline koormus – samas väikese koormusega teede katendinõuded on kujunenud leebemaks.

Juhul, kui tee/tänava koormusklassi valik tugineb loendatud koormusele sõidukiliikide löikes, tuleb kasutada Maanteeameti avaldatud siirdetegureid (Elastsete teekatendite projekteerimise juhend MA 2017-003 või uuem dokument), mitte MKM määruses 106 sisalduvaid vananenud väärtusi.

1.3. Mõõtevahendid

Kandevõime mõõtmiseks kaks usaldusväärsemat seadet on **plaatkoormuskatse** (reguleerib EVS 934:2016 ehk DIN 18134:2004) ja **FWD** (puudub ühtne standard, seda reguleerivad erinevates riikides eri tasandi normid või juhendmaterjalid – samas on erinevad FWD seadmed suhteliselt hästi ühilduvad). Tänapäeval (tegelikult viimase 10 aasta jooksul) areneb kiiresti **RWD** kompleks, mille hulka kuuluvad nii Doppleri efektil põhinevad TSD seadmed kui ka laserkaugusmõõtmisel põhinev Dynatest Raptor (fikseerib laseriribaga katte tekstuuri ja suudab täpselt sama ala mõõta ka järgmise sensoriga tuginedes digitaalsele pilditöötlusele). Tihe mõõtesamm (Raptoril 10 meetrit) annab seadmele olulised eelised just projekteerimise lähtematerjalina. Raptor on konstrueeritud

¹ <https://www.riigiteataja.ee/akt/107082015001?leiaKehtiv>

arvestades ka linnatänavate eritingimusi, veoki kogupikkus on vaid 9,5 meetrit kui TSD kasutab reeglina standardset poolhaagise alust veoki kogupikkusega 16,5 meetrit. RWD klassi seadmete hinnad ületavad miljon eurot ja tootjad eelistavad teenuse pakkumist, mitte seadme müüki. Siin on ka teine aspekt – kasutatav elektroonikatehnoloogia uueneb väga kiiresti ja tootja uuendab seadmete osad aasta-paariga uuema generatsiooni elementidega (näiteks - protsessorid, sensorid). Kogukuludest järjest suurema osa moodustab intellektuaalne, andmetöötuse pool mis vajab pidevalt rakendatud professionaale. **Kergseadmed** – LWD kuuluvad dünaamiliste gruppi ja need võib jagada kolme koolkonda (Soome, Saksa ja Taani).

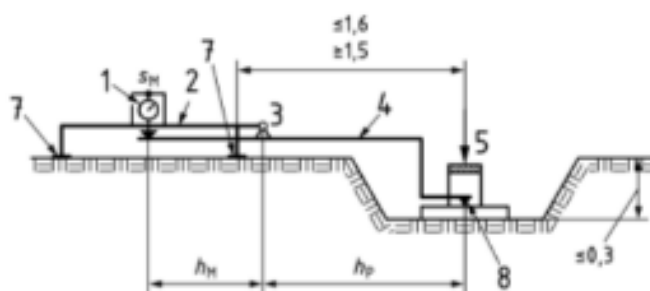
Kogu konstruktsiooni kandevõimet on võimalik mõõta vaid FWD või RWD tehnoloogiaga.

Plaatkoormuskatse

Plaatkoormuskatse teostamine vajab vähemalt 4,5 tonnist liikuvat (liigutatavat) koormust objektil ja ühe katse läbiviimine võtab vähemalt pool tundi, selleks ajaks on tööst väljas ka vasturaskusena kasutatav tehnika. Koormamisel fikseeritakse rakendatav jõud (talla diameetri alusel taandatakse see pingeaks talla all) ja vajum kas fikseeritud aja või koormuse järgi regulaarsete vahedega. Pinge ja vajumi alusel arvutatakse staatiline moodul E_v . Reeglina teostatakse kaks koormamist, esimese koormamisega (pinge talla all kuni 500 kPa) leitakse E_{v1} , teisel koormamisel ulatub koormus kuni 80%-ni maksimaalsest ja elastsusmoodul (kandevõime) E_{v2} tuletatakse 0,3...0,7 pingevahemikust mis 300 mm koormustalla ja maksimaalse koormuse 35 kN puhul vastab 250 kPa pingeolukorrale. Staatilise koormusega mõõdetud elastsusmoodul peaks kajastama maksimaalselt olukorda seisva raskesõiduki ratta all. Saksa juhendites on sätestatud mõõtorežiim teetöödel 300 mm plaadiga.

Pinge teekonstruktsiooni erinevates kihtides on erinev, katte peal on see lähedane rehvirõhuga mis võib raskeveokitel olla 600...1100 kPa vahemikus (erinevates riikides on standardtelje rehvirõhk erinev, tegelikust olukorrast sisuliselt meil ülevaade puudub sest praktikas võib täheldada, et autojuhid eelistavad ülekoormuse korral kasutada tootja poolt deklareeritud maksimumist suuremat rõhku, et sedasi vähendada riski ülekoormuse tuvastamiseks visuaalse vaatluse teel). Iga järgmine konstruktsioonikiht jagab koormuse laiemale pinnale ja kuigi koormusele lisandub ülal paiknevate kihtide omakaal, kahaneb pinge teekonstruktsioonis sügavuti kiiresti. Plaatkoormuskatse standard näeb ette ka suuremate plaatide kasutuse – 600 mm plaadi puhul on maksimaalne pinge talla all 250 kPa ja elastsusmooduli arvutuse pingevahemik on 75...175 ehk 125 kPa, 762 mm plaadi puhul 200 kPa ehk arvutuslik 100 kPa. 762 mm plaati on ette nähtud kasutada ka betoonkonstruktsioonide jaoks teostatavates mõõtmistes (betoonteed, lennuväljad). Mida nõrgemal kihil mõõtmisi teostatakse, seda suurem peaks olema seadme tald, sest iga talla jaoks on piiratud maksimaalne lubatud deformatsioon katse käigus. Poolas on võetud kasutusele ka standardist erinev režiim, mille korral leitakse kandevõime (elastsusmooduli) väärtused erinevates kihtides erineva koormuse (pinge) juures. Ka Venemaa uues standardikavandis on fikseeritud, et liival, pinnastel ja muldkehal kandevõime mõõtmisel kasutatakse 300 mm koormusplaati kuid maksimaalne pinge talla all piiratakse 250 kPa-ga. Paraku on DIN ja siit tulenevalt ka EVS fikseerinud teede puhul otseselt ainult 300 mm plaadi kasutuse.

Kasutades plaatkoormuskatset, tuleb eriti täpselt jälgida standardis sätestatud seadme paigutamise nõudeid. Seadme tugijala asukoht on osade seadmete puhul konstruktiivselt fikseeritud, varasemate modifikatsioonide puhul võib esineda lahendusi, kus tugijala paigutusel on võimalik eksida, mis mõjutab katse tulemusi (tugijalg on liiga lähedal koormusele ja jääb vajumikaussi). Siin on samuti ette antud süvistamise ulatus – kuni 30 cm, millest tuleneb, et mistahes seadmega mõõtmisel, kui soov on võrrelda tulemust plaatkoormuskatsega, tuleb rakendada samaväärset süvistamist.



Joonis 1. Väljavõte standardist DIN 18134:2012

FWD (Falling Weight Deflectometer)

FWD seade on kallis (uult ca 100,000 €), Eestis on Dynatest 8002 olemas vaid Teede Tehnokeskuses ja seda kasutatakse reeglina kontrollmõõtmisteks pärast objekti valmimist katte pinnal. Üldiselt on FWD ehitatud sõiduauto haagise raamile, mõned mudelid ka integreeritud otse kaubikusse. FWD koormusrežiim vastab maanteekiirusel liikuvale raskeveokile (50 kN, koormus talla all 707 kPa mis on lähedane raskeveoki rehvisurvega). Eestis mõõdavad kandevõimet vahel ka soomlased rootsi päritolu KUAB seadmega (tehniliselt komplitseeritud kahemassiline seade). FWD levinud kasutus on ka tee seisundi hindamiseks võrgupõhiselt, fikseeritud vahemikuga ja regulaarselt. Mõõtmine on üsna kiire, ühe punkti mõõtmiseks kulub umbes minut kuid kuna mõõtmine eeldab peatumist sõidurajal, on see elava liiklusega magistraalidel siiski ohtlik. Maailmapraktika alusel võib siiski väita, et FWD on teatud mõttes standardseade katte seotud kihtidelt mõõtmiseks, sellega võrreldakse teisi – ning kasutus siirdub rohkem rekonstrueerimise eel projekteerimiseks vajalikele mõõtmistele et optimeerida vajalikud töömahud. Igal juhul ei sobi FWD seade mitmel põhjusel ehitusaegse kvaliteedikontrolli teostamiseks. Inglise juhendi järgi (vt. allpool) tohib seotud kihtidel mõõta ka teiste seadmetega, kui nende korrelatsioon FWD seadmega on testitud (samal objektil). Seotud kihtidel mõõtmisel on oluline aspekt temperatuur, sest asfaldi elastsusmoodul sõltub tugevalt temperatuurist ja teisalt, tuleb siis asfaldikihid arvutuslikult jagada alamkihtideks kuna temperatuur asfaldi pinnakihis võib sooja ilmaga väga oluliselt erineda sügavamate kihtide temperatuurist (gradient). FWD kasutab reeglina lisaks põhiseadmele langeva koormuse all rida lisasensoreid kuni 12 sensorit kaugusel kuni 150 cm koormustsentrist, mis võimaldavad mõõta vajumikaussi ja seeläbi hinnata teekonstruktsiooni alumiste kihtide seisundit. Esineb siiski ka selliseid seadmeid, mis lisasensoreid ei kasuta (Heavy Loadman) kuid sobivad sellegipoolest tee kandevõime mõõtmiseks. Tulenevalt nii temperatuuri kui niiskuse mõjust katendi kandevõimele, taandatakse mõõdetud tulemused võrreldavaks kokkuleppelisele tasemele (TTÜ teadustöö, 2006²).

Kirjanduses käsitletakse E_0 mõistena otseselt koormusplaadi deformatsiooni baasil arvatud elastsusmoodulit, mis ei ole siiski käsitletav E_{v0} tähisega analoogselt staatilise koormuse tulemuste käsitlemisega (E_{v1} , E_{v2}) ja seega hindavad eksperdid (Dynatesti spetsialistid) E_{v0} mõistega opereerimist FWD puhul eksituseks.

² <https://www.mnt.ee/sites/default/files/survey/fwd-l6pparuanne.pdf>

LWD – Lightweight Deflectometer

LWD on samuti dünaamilise koormusega seade, kuid erinevalt FWD seadmest on siin tegemist väiksemate koormustega, seade on kergem ja odavam (hinnaklass vahemikus 5000...12000 €).

Soome koolkonda esindab Loadman (AL Engineering), seadme klooni Inspector nime all toodab OÜ Englo Eestis. Seadmele on omane suletud korpus, 10 kg raskus mis vinnastatakse (seade tuleb katsekohalt üles tõsta, raskus kallutada tagasi ülemisse asendisse kus see fikseerub ning seejärel püüda seade katsepunkti täpselt tagasi asetada), väike baastald ja lisatav suurem tald. Suhteliselt jäiga puhvriga on pinge talla all standardtallal 1,4...1,6 MPa ja suurema lisatallaga 0,5...0,6 MPa. Tulenevalt kasutatavast koormusrežiimist seadme kasutamisel ületihendatakse materjal ehk konstruktsioonikiht tasemele, mis eksisteerib ainult talla all, mistõttu mõõtmistulemus ei kajasta tegelikku kandevõimet. Tõsi on aga see, et Inspector võimaldab hinnata kui lähedale maksimaalselt võimalikule tihendustasemele on konkreetsel juhul mõõdetav kiht tihendatud. Et kergseadmete mõju ulatus konstruktsioonis sügavuti on piiratud kasutatava koormusplaadi kordsega, erinevate allikate ja võrdluseks kasutatavate parameetrite järgi on mõju ulatus 1,0...4,0D ja Inspectori ehk Loadmani puhul Loadmani konstruktoriga (Anssi Lampinen) hinnangul 1...1,5D, siis 132 mm plaadi kasutusel ei ületa seadme mõjuala killustikukihi paksust (20...25 cm). Võib vaielda, kas õige on tihendus kvaliteedi hindamiseks kasutada katseseeria maksimaalse tulemi ja esimese katse tulemi suhtarvu (Loadman) või kolme viimase katse keskmise suhet teise katse tulemisse (Inspector). Sellest sõltub vaid võrdluseks kasutatav arvvärtus. Loadmani konstruktoriga sõnul on viide sängituslöögile eksitav kuna seadme paigaleasetamise ja pööramisega saavutatakse seadme kontakt mõõdetava pinnaga ja juba esimese löögi tulemus kirjeldab mõõdetava pinna omadusi enne seadmega tihendamist. **Seadmed on mõeldud AINULT ehitatava konstruktsiooni ülakihi tihendamise taseme kontrollimiseks, mitte kandevõime mõõtmiseks ja seadme poolt välja toodud kandevõime väärtus võib olla eksitav.** Kuna teraliste materjalide puhul sõltub elastsusmoodul tugevalt pingest mida rakendatakse deformatsiooni tekitamiseks, siis ei ole võimalik välja tuua ühest korrelatsioonilist seost Soome koolkonna mõõteseadmete ja väiksema koormusega töötavate seadmete vahel, mis kehtiks üheselt nii pinnastele kui materjalidele. MaaRYL (2010) kirjeldab Loadmani vajaliku mõõteseadmena koos plaatkoormuskatsega, hilisemad InfraRYL versioonid seda otseselt enam ei sisalda.

Saksa koolkond on esindatud GDP - Zorn, HMP ja Terratest seadmetega. Neile on ühine kahe mooduli kasutamine – alumises koormusplaat deformatsioonisensoriga (aktseleeromeeter) ning eraldi ülemises moodulis varras langeva raskuse ja terasvedrudega puhvriga. Reeglina on 10 kg langeva raskusega seade kalibreeritud 7 kN koormusele ja kasutades 300 mm talda on pinge talla all 100 kPa. Tulemuseks saame dünaamilise mooduli E_{vd} . Saksa koolkonna seadmed on laialdaselt kasutusel Saksamaal koos plaatkoormuskatsega. Seetõttu on Saksa juhistes antud ka kontrollarvud kergseadmega mõõtmiseks. Baaskonfiguratsioonis on GDP seadmed reeglina ette nähtud kuni 70 MPa kandevõime mõõtmiseks. Mõõteala saab laiendada kasutades suuremat koormust (15 kg). Seade kalibreeritakse fikseeritud režiimil ja mõõteprotsessis seda ei muudeta. Võrreldes Soome koolkonnaga on selgelt eeliseks mõõteplaadi paigutus – seda ei tule liigutada seadme vinnastamiseks, piisab raskuse tõstmisest. Puuduseks võib lugeda fikseeritud režiimi ja madalat koormustaset aluse ülakihi mõõtmiseks, samuti võib koormustase osutada liialt suureks nõrkade aluspinnaste mõõtmiseks kus tegeliku koormuse all pinge võib väiksem olla. Saksa koolkonna seadmete maksimaalne kandevõime väärtus E_{vd} võib sõltuvalt seadmest olla kuni 70 MPa...225 MPa (viimasel juhul kannatab mõõtetulemuste korratavus, probleem on deformatsioonianduri täpsuses).

Saksa koolkonna LWD kasutust reguleerib USA standard ASTM E2835-11 (2015). E_{vd} mõistet kasutatakse kirjanduses valdavalt just Saksa koolkonna seadmete puhul, kuigi see võiks tähistada kõigi dünaamiliste kergseadmetega mõõdetavat. Reeglina FWD tulemuste puhul ei näidata eraldi seadme dünaamilist iseloomu.

Taani koolkonda kuuluvad Dynatesti toodetud Keros ja sellel tuginevad Prima 100 mis täna kuulub SWECO kontsernile (varem Phonix, Grontmij ja Carl Bro) ja Dynatesti LWD 3031 (nüüd ka 3032). Nende seadmete võimalused on oluliselt laiemad:

- Langev raskus kuni 20 kg, langemiskõrgus vabalt valitav, koormussensor fikseerib igal katsel tegelikult mõjuva koormuse kN
- Võimalus kasutada kaht täiendavat sensorit vajumikausi mõõtmiseks analoogiliselt FWD seadmega
- Laiem valik võimalikke koormustaldasid (100, 150, 200, 300 mm), kusjuures Dynatestil on kasutusel DPS (dual plate system), mis võimaldab ilma seadet mõõtekohalt tõstmata vahetada talladiameetrit 150/300 mm vahel.
- Keros ja Prima kasutasid koonilisi kummipuhvreid, Dynatesti puhver on kettakujuline vahtkummist. Puhvri valikuga ühtlustatakse erinevate koormuste kasutamisel mõjuimpulsi pikkus (kuigi pigem on teema mõjuva kN seose, mitte kg valikuga sest ka langemiskõrgus on valitav).

Prima tootja soovib mõõta kuni 125 MPa kandevõimega aladel 300 mm plaadiga, 125...170 MPa kandevõime korral 200 mm ja üle 170 MPa kandevõimega aladel 100 mm plaadiga. Dynatesti puhul on 200 mm plaat lisavarustuses ja loogiline on 150 mm plaadi kasutus kuna 300 ja 150 mm plaadid moodustavad DPS (Dual Plate System) - hõlpsalt ümberlülitava komplekti. Dynatesti eksperdid on soovitanud maksimaalselt hoida 300 mm tald ja minna väiksemale tallale alles siis, kui deformatsioon ei ületa 35 mikroni piiri (sel juhul on E_{vd} kuni 800 MPa). Sellegipoolest on Taani koolkonna seadmete puhul tootja poolt määratletud, et need sobivad sidumata kihtide või õhukese seotud kihi pealt mõõtmiseks. Kui kasutatakse ka lisa-andureid, siis eristatakse deformatsiooni baasil tuletatud elastsusmooduleid arvutuses kasutatud anduri asukoha järgi, sel juhul on E_0 moodul mis on arvutatud koormustsentri deformatsioonist, E_{300} ja E_{600} tähistavad vastavalt lisa-andurite deformatsioonist tuletatud moodulite väärtusi. Analüüsid korrelatsiooni laboris *triaxial load* – katsega määratud moodulitega on leitud et lisa-andurite tulemuste korrelatsioon pinnase parameetritega on suurem kui tsentriandurist tuletatud E_0 puhul.

Dynatest on 2018 lõpus välja tulnud ka olulise uuendusega – seade LWD 3032, mis sisaldab täiesti uut elektroonikamoodulit (sh Bluetooth-ühendus), samuti on uuendatud kogu tarkvarapakett. Võrreldes eelmise modifikatsiooniga on parandatud kasutajaliideseid ning võimaldatakse ühendus seadme ja Apple või Windows 10 seadmetega lisaks senisele Androidi liidesele. Taani koolkonna seadmete kasutust reguleerib USA standard ASTM E2583-07 (2015).

Töodes, kus on võrreldud Taani ja Saksa koolkonna seadmeid, on tihti E_{vd} eristamiseks kasutatud üla- või alaindeksit z – saksa seadmetele (Zorn) või d – taani seadmetele (Dynatest).

1.4. Eritingimused

1.4.1. Kontrollitav parameeter ja mõõtetetingimused

Kuna materjalide elastsusmoodulid sõltuvad mitmetest parameetritest, peeneteraliste materjalide puhul eelkõige niiskusest, jämedamate materjalide puhul ka pingerežiimist, siis Skandinaavia riikides kontrollitakse valdavalt mitte kandevõime väärtust (E_{v2}) üksi, vaid pigem tihendamise kvaliteeti E_{v2}/E_{v1} suhtarvu kaudu, kusjuures maksimaalselt lubatava suhtarvu väärtus ei ole konstant vaid sõltub kandevõime E_{v2} väärtusest. Maanteeameti juhises³ (P4.5.9) on sätestatud nõutava kandevõime E_{v2} väärtuseks vähemalt 150 MPa ja E_{v2}/E_{v1} suhteks mitte üle 2,5. See nõue üldistatuna kõigi teede kohta, sh kergliiklustee mida võib kasutada teenindav transport, ei ole adekvaatne arvestades Saksa normides antud oluliselt laiemat kahvlit. Samuti on Teede Tehnokeskuse uuring 2017 mõõdetud tulemuste analüüsis selgelt näidanud, et eeltoodud nõuded reeglina ei ole täidetavad meie ehituspraktikas (kasutatavate ehitusmaterjalide ja konstruktsioonidega). Maanteeameti juhises⁴ (P4.18) kinnitatakse, et *paigaldatud ja tihendatud täitepinnase ja täitematerjali kandevõime peab vastama katendiarvutuses toodud näitajatele. Kuna kandevõime määramine LOADMAN või INSPECTOR tüüpi seadmega ei ole mõeldud näitamaks katendiarvutuses toodud kandevõime väärtusi, siis tuleb vajadusel hinnata kandevõime vastavust katendiarvutusele plaatkoormuskatsega DIN 18134. Katendiarvutuse ja plaatkoormuskatse omavahelist vastavust aga ei ole tõestatud.*

Teiste riikide katendite ehitusjuhiste järgi kontrollitakse valdavalt iga kihi tihendustegurit, viited otseselt kandevõime võrdlusele arvutuslikuga on selgelt esitatud Soome juhistes. Saksa süsteemi E_{v2} kontroll ja analoogselt ka paljudes teistes plaatkoormuse puhul seni kasutatava kandevõime numbriga tagama ei ole seotud katendiarvutusega. Oluline küsimus katendite konstrueerimises seisneb selles, kas aluskonstruktsioon on kõigi erinevate koormusklasside puhul konstantne ehk ühine. Juhul kui see on nii, siis võib sidumata kihtide mõõtmisel võrdse taseme nõudmine olla põhjendatud. Uuritud süsteemides on reeglina madalaima (Saksa) ja tihti ka sellele lähedaste koormusklasside puhul (Soome) aluse nõuded madalamad. Rootsis on aluskonstruktsioon püsiv (42 cm purustatud kaljupinnast ja 8 cm killustikku mis silub pinna – suurte koormuste puhul kasutatakse siin ka killustiku immutamist). Soome juhises⁵ on olulisel kohal nõue projekteeritava konstruktsiooni aluse kandevõimele sõltuvalt tee klassist ja konstruktsiooni liigist (killustikalusel sõltuvalt tee koormusklassist 115...160 MPa, tsementstabiliseeritud alusel fikseeritud 290 MPa).

InfraRYL (2018) sätestab nõuded muldkeha pinna tihendustegurile, reeglina 92%, vähemalt 90% (Proctor-tiheduse suhtes). Plaatkoormuskatsega peaks muldkeha keskmine kandevõime olema 120 MPa ja üksik-katsel vähemalt 100 MPa. Samad väärtused mõõdetuna FWD seadmega, on vastavalt 140 ja 115 MPa. Detailsemalt on määratud ka E_{v2}/E_{v1} suhtarv mõlemal juhul, sõltuvalt konkreetsest kandevõime väärtusest (kuni 125 MPa kandevõime puhul plaatkoormusel mitte üle 2,6 ja FWD seadmel mitte üle 2,2 ning iga järgneva 15 MPa kohta suureneb lubatud suhtarv 0,1 võrra). Soome tüüplahendustes järgneb muldkehale vajadusel filterkiht (ekslikult on seda peetud ka drenikihi) mida võib asendada ka geosüntee (funktsioon: materjalide eristamine, kapillaartõusu takistamine)

³ https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/ehitus/killustikust_katendikihtide_ehitamise_juhis.pdf

⁴ https://www.mnt.ee/sites/default/files/content-editors/Failid/Juhendid/ehitus/muldkeha_ja_dreenikihi_juhis_05_01_16.pdf

⁵ <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>

ning alus, mis koosneb jagavast kihist (madalamakvaliteediline killustik või kruus, peenosis max 9%) ja kandvast kihist (reeglina killustik, peenosis killustikul max 7%, purustatud kruusal max 9%).

InfraRYL (2017) sätestab nõuded sidumata aluse tihendustegurile E_{v2}/E_{v1} sõltuvalt kandevõime E_{v2} väärtusest (tabelid 21310:T4 ja 21310:T5) nii plaatkoormuskatse kui FWD seadme jaoks.

FWD kasutamine sidumata kandevkihi kandevõime mõõtmiseks ei ole tavapärane. FWD kasutatakse reeglina siiski kogu katendi kandevõime mõõtmiseks.

Katendid peaksid olema dimensioneeritud nii, et ka ebasoodsamas olukorras oleks kandevõime tagatud, seega reaalselt võiksime eeldada, et mõõdetav E_{v2} väärtus võib olla märkimisväärselt suurem kui juhendis sätestatud miinimum. Siit tulenevalt on ka loogiline, et oluliselt suuremate E_{v2} väärtuste korral võib E_{v2}/E_{v1} suhtarv minna suuremaks.

Kandevõime kontrollmõõtmise mõte peaks olema kogu konstruktsiooni kvaliteedi tagamises. Kui ehitajalt nõutakse täpselt projektijärgset ehitust ilma konstruktsiooni muutmise (täiendamise, tugevdamise) loata, võime jõuda järeldusele et kandevõime väärtus ei sõltu ehitajast, tihendusteguri väärtus sõltub. Seega tuleks arendus kandevõime kontrollmõõtmiste kontekstis suunata paindlikuma hankesüsteemi suunas, mis võimaldab ehitajale teatud vabadused soovitud tulemuse saavutamiseks. Saksa süsteemis on selleks näiteks nõue aluspinnase kandevõime (45 MPa) kohta, mille saavutamiseks projektis konkreetseid meetmeid ette reeglina ei nähta.

Mõõdetav kiht ja selle olukord

Mõõtmistulemus – kandevõime väärtus – sõltub oluliselt ka mõõtmistingimustest. Konkreetne katendikonstruktsiooni kiht töötab tavaliselt naaberkihtide vahel (v.a. kulumiskiht ehk kattekonstruktsiooni ülakiht). Siit tulenevalt tööolukorras on mõõdetava kihi materjali osakeste võimalus külgsuunas (kõrvale ja üles) liikumiseks piiratud (*confinement*). Kui võrrelda näiteks liivakihi mõõdetavat tulemust, siis madalaim on tulemus kui mõõta vahetult liivakihi peal. Parema tulemuse saab, kui eemaldada mõõteseadme talla alt liivakihi ülaosa 10-15 cm ulatuses (standard lubab süvistamist kuni 30 cm). Sellel on kaks põhjust, ühelt poolt, on tegemist asjaoluga, et pealmine liivakiht takistab alumise osa külgsuunalist liikumist ning teiselt poolt, tihendusprotsessis tihendustehnika (teerulli) liikumisel liigub tihendatava kihi ülaosa materjal iga läbikuga ja sisuliselt ei tihene. Märkimisväärselt parema tulemuse saame, kui mõõdame liivakihi kandevõimet pärast järgmise, reeglina killustikukihi paigaldamist. Sel teel tegelikult tihendatakse liiva läbi killustiku ning vahetult tihendustehnika kontakt liivakihi puudub, tulemusena tiheneb ka liiva ülakiht. Selliseks mõõtmiseks eemaldatakse pärast killustikukihi tihendamist mõõteseadmele vajalikult alalt killustik ja silutakse pind mõõtmiseks.

Stabiliseerimise puhul paigaldatakse tihti killustikalus ja stabiliseerimiseks vajalik killustik koos, sel juhul ei ole võimalik killustikalust tihendada nii, et selle kandevõimet saaks eraldi mõõta. Seega ei ole võimalik ka eraldi killustikaluse vastuvõtukatsete teostamine vastavuses MKM määruses toodud kvaliteedinõuetega.

Killustiku kihtide mõõtmisel esineb sisuliselt sama efekt nagu liival – mõõtmistulemus ei peegelda kihi tegelikku töörežiimi, kus kihi peale paigaldatavad kihid välistavad materjali liikumise koormuse alt välja. Summaarses pinges on vertikaalkomponent oluliselt väiksema kaaluga kui horisontaalkomponent.

Möötmistasapinna mõju möötmistulemustele vajab siiski veel rakendusuuringut, et täpsustada ja diferentseerida nõude väärtus sõltuvalt möötmistasapinnast (seda nii liivalt kui killustikult möötes) sest möötetööde eesmärgiks peaks olema kvaliteedikontroll vahetult kihi paigaldamise järel et mittevastavuse korral oleks võimalik kas materjali asendada või täiendavalt töödelda (nt. kastmine, tihendamine) enne järgmise kihi paigaldamist.

Geosünteedide kasutus

Juhul, kui konstruktsioonis kasutatakse geosünteede (geokangad, geovõrgud), mõjutab nende kasutus mõõdetava kandevõime väärtust kõigi möõteseadmete korral. Viimased uuringud on kinnitanud, et geosünteedi kasutusest tingitud kandevõime puudujääk on taastuv ja taastumisprotsessi seletatakse järeltihenemisega teekonstruktsiooni ekspluatatsiooni käigus. Meie katsed (T-Konsult 2017-2018) näitavad, et kandevõime kahanemise ulatus sõltub geosünteedi peale paigaldatud materjali kihi paksusest. Täpsemate uuringute puudumisel kasutame kandevõime möötmistulemuste juures mõõdetava kandevõime nõude mahaarvamist sõltuvalt geosünteedi peale paigaldatud kihi paksusest, 20 cm kihi korral 30%, 50 cm kihi korral 0% (vahepealsed väärtused interpoleerimisega). Fikseerides tegeliku kasutuse juures näidud nii aladelt kus geosünteede kasutatakse, kui ka aladelt kus neid ei kasutata kuid konstruktsioon on analoogne, saame piisava võrdlusmaterjali et juhendi järgmise ülevaatamise käigus nõudeid korrigeerida.

Pingerežiim

Eeldades, et katendikonstruktsiooni arvutusparameetrid vastavad tööolukorrale, tuleb materjalide parameetrid määrata tööolukorrale lähedastes tingimustes, teraliste materjalide puhul tähendab see pingerežiimi. Teisalt, möõtes kandevõimet teekonstruktsioonis, tuleb seega ka eeldada, et kasutatakse maksimaalset kandevõimet võimaldavat/näitavat meetodit (möötmise läbi järgmise kihi). Me soovime siduda mõõdetava tulemuse arvutuslikuga (täna see seos ei ole lõplik, eeldame et lähim seos on Odemarki valemi ja plaatkoormuskatse tulemuste vahel), järelikult on tarvilik eristada nõuetes mõõtetulemused vahetult kihil (tehnoloogiline, mille eesmärk on välja selgitada parandusmeetmete rakendamise vajadus enne järgmise kihi paigaldust) või mõõdetuna läbi järgmise kihi (arvutuslik).

Plaatkoormuskatse (300 mm tald, 35 kN) puhul vastab mõõdetav 250 kPa režiimile, Soome koolkonna LWD seadmetel sõltub see kasutatavast tallast, üldistatult on suure talla all pinge ca 500 kPa, väikese talla all 1500 kPa. Saksa seadmed töötavad reeglina fikseeritud 100 kPa režiimis ja Taani seadmetel saab pingerežiimi valida vastavalt vajadusele.

Soomes välja töötatud katendiarvutuse tarkvaras APAS eeldatakse, et sidumata aluse ülakihis on pinge 160 kPa, jagava kihi peal 70 kPa ja aluspinnasel 40 kPa. Taani juhistes soovitatakse kandevõime möõtmistel sidumata alusel kasutada pingevahemikku 200...300 kPa ja aluspinnastel sõltuvalt pinnase liigist, nõrgematel pinnastel 50...100 ja moreenpinnastel 100...200 kPa vahemikku.

Kuna Loadman ja Inspector kasutavad möõtmisel pinget mis kordades ületab teekonstruktsiooni vastavas kihis maksimaalselt esineva, on nende seadmete kasutamine kandevõime möõtmiseks välistatud. Samas ei saa vaidlustada nende seadmete võimekust materjali tihendamise ulatuse hindamisel – mitmekordse ülekoormusega ületihendatud kihi deformatsiooni (tegelikult küll aktseleeromeetri kiirendusnäitaja kaudu arvatud) võrdlus katsetamise algfaasis esinenud näitajaga iseloomustab tihendusprotsessi ulatust, kuid kindlasti mitte teekonstruktsiooni kandevõimet, seda muuhulgas seetõttu, et killustikalusel kasutatava väiksema talla diameetri tõttu on seadme

toimeulatus väike (Loadmani konstruktori hinnangul 1,5D mis Inspectori 140 mm puhul on 21 cm) ja seega tulemus kajastab vaid ülemise kihi omadusi. Et killustiku elastsusmoodul sõltub tugevalt pingerežiimist, siis ei saa seadme arvutatud elastsusmoodul (kandevõime väärtus) kuidagi olla vastavuses katendi kontrollarvutuses esitatud kandevõime väärtustega. Ka eelviidatud muldkeha ja drenkihi juhises tõdetakse, et muldkeha ja drenkihi tihedust kontrollitakse LOADMAN- või INSPECTOR-tüüpi seadmega elastsusmoodulite suhte mõõtmise teel.

1.4.2. Saksa seadmed ja mõõtetulemuste omavahelised seosed

Saksa seadmete kasutamisel on erinevates normdokumentides toodud erinevad seosed E_{v2} ja E_{vd} (GDP - Saksa koolkonna seadmed) üleminekuks. Näiteks raudteestandardis RiL 836 (Deutsche Bahn AG) on toodud seosed:

	Raudtee kaitsekihil mõõdetult					Raudtee aluspinnasel mõõdetult				
E_{v2}	120	100	80	50	40	80	60	45	30	20
E_{vd}	50	45	40	35	30	40/35	40/35	35/30/25	25/20	20

Tabel 1. Saksa koolkonna LWD ja plaatkoormuskatse võrdlus raudteestandardis

Aluspinnasel mõõdetuna vastavad E_{vd} väärtused peenpinnasel või pideva terastikulise koostisega materjalidele, jämedateralistel tuleb kontrollarv valida 5 MPa suurem. Geosünteedide kasutamisel vähendatakse nõutud väärtust 25% (lihtsustatud lähenemine, sest tõenäoliselt on lisaks ka seosed nii geosünteedide tehniliste parameetritega kui geosünteedi peal paikneva materjalikihi paksusega).

ZTVE-STB 94 (2005) järgi miinimumkvantii 10% alusel (st kuni 10% tulemusi võib olla nõrgemad antud väärtustest)

E_{v2}	120	100	80	45
E_{vd}	65	50	40	25

Tabel 2. Saksa koolkonna LWD ja plaatkoormuskatse võrdlus standardis ZTVE

Erinevate pinnasegruppide kohta kasutatakse ka erinevaid nõudeid (seega ei ole selles osas olemas ühtset lähenemist, seos sõltub mõõdetava materjali/pinnase terastikulisest koostisest), neid on täpsemalt uuritud ka mitmes bakalaureuse- ja magistritöös nii Saksamaal kui ka Eestis:

Pinnase/materjali grupp	E_{v2}	E_{vd}	Tihendustegur D_{pr}	E_{v2}/E_{v1}
GW, GI (kivine pinnas, 0/32; $Cu^6 > 6$)	120	65/60	103	2,3 2,5 2,6
	100	50	100	
	80	40	98	
	70	35/30	97	
GE ($Cu < 6$), SE, SW, SI	80	50/40	100	2,3 2,5 2,6
	70	40/35	98	
	60	35/32	97	
Peeneteralised pinnased ja segud	45	25	100	
	30	15	97	
	20	10	95	

Tabel 3. Saksa LWD, plaatkoormuskatse ja tihendustegurite seosed erinevatel pinnastel

⁶ Cu – lõimisetegur, d_{60}/d_{10} (sõeladiameetrite, mida läbib vastavalt 60 või 10% materjalist, suhe)

Elastse kattede konstruktsiooni (seotud kihi) kandevõime määratakse dünaamilise impulsskoormusega kasutades FWD (Falling Weight Deflectometer) seadet. FWD ja plaatkoormuskatsega mõõdetud kandevõime väärtused peaksid prof. Sürje järgi kajastuma valemis:

$$E_s = 1,34 \cdot E_d^{0,88} \quad , \text{ kus:}$$

- E_s – staatiline elastsusmoodul (plaatkoormuskatse); E_d – FWD-ga mõõdetud E-moodul.

Erinevates töödes on esitatud ka sidumata kihtidel teostatud mõõtmiste võrdlused kergseadmetega, FWD võrdlus on teostatud ka R.Eichfussi magistritöös (TTÜ 2018) suhteliselt hea korrelatsiooniga, asfaldil ja pinnatud freespurukattel.

T-Konsult OÜ teostatud sidumata kihtide kandevõime mõõtmise võrdluskatsete üldistamisel võib teha järelduse, et Dynatest LWD (ja teiste Taani koolkonna kergdeflektomeetrite) kasutamisel on üleminekutegur Inspector/Loadman näitajatele 1,3. ($E_{\text{inspector}} = 1,3 \cdot E_{\text{dynatest}}$) Seejuures kasutatakse liival ja muldkehal 100 kPa režiimi (300 mm tald) ja killustikalusel 300 kPa režiimi (150 mm tald).

1.4.3. Inglise normid ja mõõtmiste süsteem

Inglise teekonstruktsiooni aluste projekteerimise normides (draft HD25) – Interim Advice Note 73/06 (2009)⁷ on alused jagatud nelja tüüpi nende kandevõime järgi (50, 100, 200, 400 MPa).

Koormussageduse järgi leitakse Inglise juhendis vajalikud asfaldikihtide paksused valitud alusele.

Käsitledes ainult sidumata segusid, on tegemist 1 ja 2 klassiga vastavalt 50 või 100 MPa

kandevõimega. Kandevõime kontroll teostatakse ehitusprotsessis ning vajalik on saavutada 80%

arvutuslikust tasemest viie järjestikuse katse libiseva keskmise väärtusena. Seejuures ei tohi ükski

mõõtmine anda väiksemat tulemust kui 50% arvutuslikust tasemest. Tugevamate aluste puhul

eristatakse kiirkivinevaid (enam kui 50% survetugevusest saavutatakse 28 päevaga) ja aeglase

kivinemisega segusid (28 päevaga kuni 50% survetugevusest). Seotud kihtide puhul tuleb võivad

nõutud väärtused olla koguni kõrgemad arvutuslikust, nii seetõttu, et mõõdetakse dünaamilise

kergseadmega, kus kasutatava madalama koormuse tõttu jäävad deformatsioonid seotud kihtidel

väiksemaks kui reaalseste koormuste korral – kui ka tulenevalt arvutuste aluseks oleva režiimi valikust

(tugevusnäitaja kihi tööea lõpuks). Kui aluspinnase kandevõime jääb alla CBR 2,5% taseme, tuleb

ette näha aluspinnase asendamine (50...100 cm) või tugevdamine. Tihti kasutatakse teisenduseks

lihtsustatud valemit $E = 17,6 \cdot \text{CBR}^{0,64}$ mille järgi 2,5% tasemele vastab 31,6 MPa (ja 100% ehk

etalonmaterjalile 335 MPa). Näiteks Rootsis ja Saksamaal on lävendiks, mis tuleks aluspinnasel

tagada – 45 MPa (kui see pole tagatud siis tuleb aluspinnas tugevdada).

Näitaja	Grupp	Klass 1	Klass 2	Klass 3	Klass 4
Pikaajaline (arvutuslik) kandevõime, MPa		50	100	200	400
Mõõterežiim (max pinge talla all), kPa		100	100	200	200
Libisev keskmine kandevõime, MPa	Sidumata segu	40	80	-	-
	Kiirkivinev segu	50	100	300	600
	Aeglaselt kivinev segu	40	80	150	300
Minimaalne kandevõime, MPa	Sidumata segu	25	50	-	-
	Kiirkivinev segu	25	50	150	300
	Aeglaselt kivinev segu	25	50	75	150

Tabel 4. Väljavõte UK juhiseist iAN 73/06

Tabelis toodud numbrid on mõõdetavad vahetult enne järgmise kihi paigaldamist. Mõõtmised teostatakse dünaamilise plaatkoormuse katsega, nii FWD kui LWD seadmetega. Kui mõõteseadmeks

⁷ <http://www.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/ians/pdfs/ian73rev1.pdf>

on LWD, tuleb Inglise juhise järgi eelnevalt teostada korrelatsioonikatse, milleks mõõdetakse kandevõime 25 punktis nii FWD kui LWD seadmetega, korrelatsioon kahe mõõteseadme tulemuste vahel (r^2) peab olema vähemalt 0,45. Sellest katsest saadakse ka seos, mida tuleb kasutada LWD tulemustele, teisendades need samasse skaalasse FWD seadmega. Vajumi väärtus võiks jääda vahemikku 100...1000 mikronit (0,1...1 mm). Sidumata kihtide kandevõime mõõdetakse mitte varem kui 24 tundi peale paigaldamist, kiirkivinevatel (vähemalt 50% projektsest kandevõimest 28 päevaga) seotud kihtidel 7 päeva järel paigaldamisest ning aeglaselt kivinevatel kihtidel vahetult enne graafikujärgset järgmise kihi paigaldamist. Kui ehituskorraldus näeb ette varasema või hilisema katmise, võib olla vajalik katseala rajamine. Soovitatav on teostada kandevõimemõõtmised ka aluste vahepealsetel kihtidel et saada varem jaole võimalikele probleemidele alakihtides.

Nagu näha, nõutakse Inglismaal korrelatsiooni FWD seadmega ja tulemused teisendatakse FWD skaalasse. Kui kasutatakse tagasiarvutuse tehnoloogiat, on Poissoni tegur tsemendiga stabiliseeritud segudel 0,35 ja purustatud kivimaterjalidel ning pinnastel 0,45.

1.5. Odemarki valem ja katendikonstruktsiooni kandevõime

Nii Soome ja Rootsi katendilahendustes kui ka Saksa tüüpkatendikonstruktsioonides kasutatakse sidumata aluses killustikku või kruusa, aluse alakiht on soome süsteemis nimetatud jagavaks, saksa süsteemis kaitsekihiks ja materjali nõuded piirduvad reeglina peenosiste sisalduse piiramisega – ülakihis 5% materjalina ja 7 või 8% pärast tihendamist, alakihis on nõuded veidi leebemad. Sellisel kujul on tegemist kindlasti külmakindla ja vett läbilaskva kihiga, mis takistab ka kapillaartõusu. Eraldi dreengikihi filtratsiooninõude väärtust ei esitata.

Saksa tüüpkatendite analüüs

Et uurida, milliste elastsusmooduli väärtuste või seostega on Saksa tüüpkatendites arvestatud, püüdsime võrrelda kandevõime juurdekasvu väärtust analoogilise konstruktsiooni korral, kus erisus piirdus killustiku või kruusa kasutamise aluse ülakihis. RStO 12 tabel 1 rida 3 käsitleb killustikku ja rida 4 kruusa aluse ülakihina. Selle järgi tõuseb kandevõime 15 cm killustiku või 20 cm kruusaga nii tasemelt 100 MPa tasemele 120 MPa (madala koormusklassi puhul – kuni 300,000 normtelge) kui ka 120-lt 150 MPa tasemele (kõigil ülejäänud juhtudel, sealhulgas tabel 2 rea 3.2 järgi 20 cm killustikuga). Esimesel ja teisel juhul saame tagasiarvutuste järgi hinnata killustiku ja kruusa elastsusmoodulid, kuid kolmas on sellega konfliktne. Tabelist tuleneb, et Saksa süsteemis nõutud kandevõime väärtused ja kihipaksused ei ole seotud kandevõime arvutustega vaid on määratud lähtuvalt teistest (tõenäoliselt tehnoloogilistest) kaalutlustest.

Kiht cm	Killustik					Kruus				
	15	15	20	25	25	20	20	25	30	30
All E_{v2}	120	100	120	120	120	120	100	120	120	120
Peal E_{v2}	150	120	150	180	150	150	120	150	150	180
MPa/cm ⁸	2,0	1,33	1,50	2,40	1,20	1,50	1,00	1,20	1,00	2,00
Viide juhendi tabelitele	T1-3 T3-5	T1-3 T3-1 T3-5	T3-1 T2-3.2	T3-1	T3-1	T1-4 T3-6	T1-4 T3-2 T3-6	T3-2	T3-2	T3-2
Odemark – E*	230,5	169,5	195,0	257,5	180,0	195,0	148,0	180,0	172,4	236,3

⁸ Tinglik väärtus mis näitab kandevõime lisandumist (MPa) kihi paksuse ühiku (cm) kohta

Tabel 5. Üldistatud väljavõte Saksa tüüpkatendite juhendust RStO 12

* Odemarki valemiga arvatud aluse kandevõime väärtus, juhindudes Soomes kasutatavatest vaikeväärtustest.

Põhimõtte, et 45 MPa tuleb aluspinnaselt kätte saada ja sellest edasi rakendada standardset konstruktsiooni, on äärmiselt teretulnud. Sel juhul on aluspinnase ja muldkeha rajamisega homogeniseerimise teemad lahendatavad eraldi ja teekonstruktsiooni ülemises osas ei pea arvestama aluspinnaste erisustega. Samas eeldatakse sel juhul ka, et ehitusprotsessis mõõdetakse aluspinnase kandevõime kohe pärast kasvupinnase koorimist ja esmatihendamist. Ülaosa tüüplahendused (valdavalt asfaldikihtide paksused, aga ka stabiliseeritud kihtide vajadus) sõltuvad üheselt koormustest. Saksamaal aga ka Poolas on enam levinud aluspinnase stabiliseerimine, eriti aladel, kus geoloogiline profiil on väga muutlik, et tagada ühtlane ja ühetaoline baas katendikonstruktsioonile. Kasutatakse nii mehaanilist stabiliseerimist (aluspinnasele lisatakse liiva, kruusa või killustikku ja materjal segatakse pinnasega) või keemilist stabiliseerimist kasutades sideainena lupja või tsementi koos teiste lisanditega. Probleemseks võib kujuneda paindlik lähenemine, kus otsus tugevdamise vajalikkuse kohta tehakse alles ehitusprotsessis, mitte projektis ja seetõttu ei ole riigihanke korralduses tööde maht väga täpselt prognoositav.

Skandinaavia nõuded plaatkoormuskatsele

G.M.Trumm on TKTK lõputöös⁹ kokkuvõtlikult välja toonud nõuded Soomes, Rootsis ja Norras. Soome kandevkihil on nõutud E_{v2} vähemalt 120 MPa ja E_{v2}/E_{v1} mitte üle 2,0 (erandina kvaliteediklass 2 – E_{v2} 100 MPa).

Jagav kiht (kruus, killustiku alakiht), PLT		Kandev kiht (killustikaluse ülakiht)		
E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1} ; PLT	E_{v2}/E_{v1} ; LWD
<125	≤2,2			
125...134	≤2,3			
135...144	≤2,4	<145	≤2,0	≤ 1,7
145...154	≤2,5	145...159	≤2,1	≤ 1,8
155...164	≤2,6	160...174	≤2,2	≤ 1,9
165...174	≤2,7	175...189	≤2,3	≤ 2,0
175...184	≤2,8	191...204	≤2,4	≤ 2,1
>185	≤2,9	205...219	≤2,5	≤ 2,2
		220...234	≤2,6	≤ 2,3
		>235	≤2,7	≤ 2,4

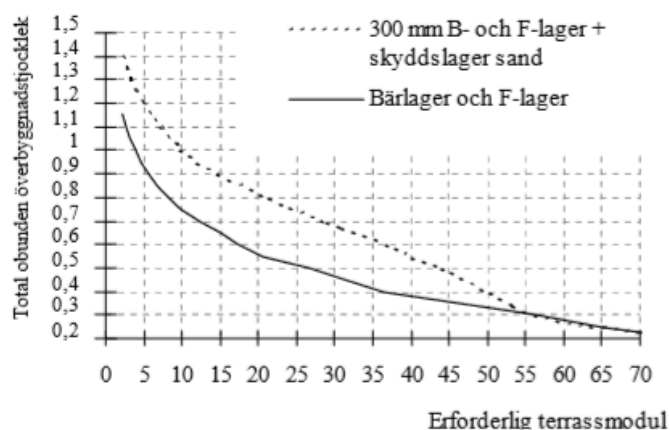
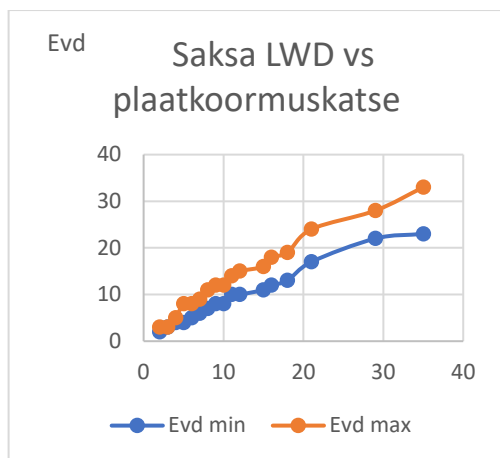
Tabel 6. Koondnõuded InfraRYL (2017) tabelitest killustikalustele plaatkoormuskatse jaoks (täiendatud: ka FWD jaoks)

Teistes riikides esinevad analoogilised reeglid, kuigi otseselt numbrilised väärtused võivad olla veidi erinevad. InfraRYL annab sarnased parameetrid ka FWD mõõtmistulemustele (suhtarvu väärtus FWD jaoks on iga konkreetse kandevõime väärtuse puhul 0,3 võrra madalam). Norras on kandevkihile (sidumata alus) nõue $E_{v2} \geq 150$ MPa ja $E_{v2}/E_{v1} \geq 2,5$. Muldkehalt (kruus, liiv) nõutakse 120 MPa ja $E_{v2}/E_{v1} \leq 3,5$.

Rootsis (VVMB 606 – DIN 18134 analoog) tehakse plaatkoormuskatset killustikalusele kuni D125 mm (purustatud kaljupinnas, 98% läbib sõela) ning nõuded ja E_{v2}/E_{v1} kuni 120 MPa kandevõime puhul kuni 2,8 ja edasi valemiga kuni väärtuseni $E_{v2}/E_{v1} \leq (1+0,015 * E_{v2})$. Nõuded kandevõimele on

⁹ http://eprints.ttkk.ee/4045/1/l%C3%B5put%C3%B6%C3%B6_G_M_Trumm_2018.pdf

sätestatud juhistes 1994:25 ja 2008:79 vahemikus 45...150 MPa. Rootsi juhendis on antud ka võrdlus Saksa kergseadmega nõrkade aluspinnaste määramiseks (esitatud vahemikena) et selle järgi otsustada vajaliku lisakihi paksus.



Tabel 7. Võrdlus Saksa LWD ja plaatkoormuskatsega Rootsi teedenormidest

Odemarki valem ja materjalide elastsusmoodulid

$$E_p = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}}$$

Soome katendite projekteerimisjuhendis on toodud lihtne valem

(1)

kus E_p on kandevõime arvatava kihi peal, E_a selle all, E materjali elastsusmoodul, h kihi paksus (m) ja a konstant (0,15 m).

Käesolevas töös on kasutatud materjalide elastsusmooduleid alljärgnevalt:

- SMA – 3200 MPa
- AC surf, bin – 2500 MPa
- AC base – 1400 MPa
- TS-32 – 1500 MPa (Soome analoog – 7 p survetugevus 3...5 MPa)
- Korebetoon – 3500 MPa (Soome analoog – 7 p survetugevus üle 5 MPa)
- Killustik – 280 MPa
- Liiv – 70 MPa

Odemarki valem annab võimaluse juhul, kui tegelikult aluspinnaselt mõõdetud kandevõime väärtus ei rahulda vajalikku nõuet 45 MPa, korrigeerida konstruktsiooni (asendades arvatava paksusega aluspinnase kihi materjaliga).

Uurimistööde suunad lähiaastateks

Tänaste teadmiste valguses tuleb lähiaastatel tegeleda materjalide omaduste täpsustamisega, uurimistööd on suunatud:

- AC – arvestada bituumeni liiki (lisaks levinud 70/100 bituumenile nii madalama kui kõrgema penetratsiooniga tavabituumenid kui ka polümeerbituumen), kivimaterjali tugevusnäitajat (LA) ja asfaldi terasuurst. Soome süsteemis kasutatakse arvutusteks asfaldikihtide kogupaksust koos kaalutud keskmise elastsusmooduliga. Rootsi uuemad teadustööd

näitavad, et polümeerbituumenite korral ei peegelda ka elastsusmooduli väärtus adekvaatselt kihi eluiga mõjutavaid omadusi. Siit tulenevalt on lähiaastatel eeldada ka uusi uuringuid, mis võivad senise katendiarvutusprotsessi praktika muuta. Vene Föderatsioonis on koostatud uus katendi projekteerimisjuhend (projekt, 2018)¹⁰, kus on oluliselt täiendatud erinevate asfaltbetoonide arvutusparameetreid (erinevad bituumenid sh ka USA SuperPave süsteemi segud ja erinevad terasuurused). Leedus on viimastel aastatel läbi viidud rida teadustöid, kus on püütud USA katendiarvutuse tarkvara rakendamiseks leida vajalikud arvutusparameetrid erinevatele asfaltbetoonisegudele (sõltuvused nii bituumenist kui terasuurusest).

- TS – elastsusmooduli sõltuvus valitud segu tugevusnäitajatest (võimalik kasutada erinevaid hüdraulilise sideainega nii tehases kui teel segatud segusid, võrdleva analüüsi aluseks Taani lahendid, kus kasutatakse segusid C5/6 mille E kahaneb eksploatatsioonis 7500...1500 MPa, kuni C21/28 vastavalt 24,300...2000 MPa ja Soome lahendid mille järgi 28-päevane survetugevus 1,5 MPa vastab E-moodulile 600 MPa, 2,5 MPa vastab 1200 MPa-le, 7-päevane 3 MPa – 1500 MPa ja 5 MPa – 3500 MPa)
- Killustik – elastsusmooduli sõltuvus killustiku liigist, max terasuurusest ja tugevusnäitajatest (LA) – täna on riigiteedel kasutatava KAP programmi korral kasutusel seos killustiku liigiga ja diferentseeritud elastsusmoodul tugevamate ja nõrgemate killustike vahel (240/280), kuid tõenäoliselt on tegelik pilt keerulisem, ka Soomes kasutatav jaotus tera suurusest (100...280 MPa) ei ole tegelikult piisav sest ei võta arvesse paekillustikku ja killustiku liigilist erisust. Vene uuemas juhises (2001) varieeritakse killustiku mooduliga 180...300 MPa, kiilutud segudel 300...500 MPa.
- Liiv – elastsusmooduli sõltuvus liiva näitajatest ja niiskusest (Vene süsteemi järgi materjalide omadused niiskusest ei sõltu, kuid tegelikkuses ka see nii lihtne pole).
- Külmstabiliseerimine (TS, BS, KS) – kvaliteedikontroll kandevõime mõõtmise teel (kuni 4 h ja 24 h tihendamisest), mis asendab survetugevuse ja lõhestus-tõmbetugevuse laboratoorse kontrolli

Kui uuringute tulemused annavad piisava aluse kontrollarvutuste täiendamiseks, täpsustatakse nõudeid materjalile ja vajaliku kandevõime numbriid. Samuti võetakse arvesse ehitusprotsesside kvaliteedikontrolli käigus teostatud mõõtmistööde tulemused.

1.6. Teekatendi konstrueerimisest ja materjalidest

Korebetoon

Algselt oleme kaalunud korebetooni C12/15 kasutamist teekonstruktsiooni aluses. Et 12 MPa survetugevust loetakse piiriks, mille ületamisel tuleb kaaluda vuukide kasutamist (kivinemisel tekivad liialt suured monoliidid ja vastavalt suuremad praod, mis võivad peegelduda teekonstruktsiooni ülakihtidesse), on otstarbekas kasutada küll korebetooni, kuid langetada selle tugevusnõuded näiteks Taani juhise järgi tasemele C5/6, C6/8 või C8/10 (täna standardid reguleerivad C8/10 kuid madalama survetugevuse nõude puhul on otstarbekas sätestada vajalikud parameetrid vahetult tüüpkatendite juhises). Soome juhises on fikseeritud tasemed 3...5 MPa ja vähemalt 5 MPa. Seega vajalik/võimalik vahemik on 5...10 MPa. Et korebetoon on muldniiske, sõltub selle laboratoorse survetugevuse katse tulemus väga tugevalt sellest, kui hästi proovikeha

¹⁰ ПНСТ 265—2018 – kehtib 15.05.2018 kuni 15.05.2021 ja asendab 2001 kehtestatud ODN.

tihendatakse. Tänapäevased regulatsioonid sobivad tavabetoonidele, korebetooni korratavad tulemused on võimalik saada objektidel (katselõigul) puuritud proovikehadest, mis on tihendatud ehituses kasutataval meetodil. Tsementstabiliseerimiseks nimetaks tulemust survetugevuse vahemikus 2...5 MPa, üle selle korebetooniks. Lähiaastatel tuleks teha võrdluskatsed erinevate laboratoorsete tihendusmeetoditega ja reaalset objektidel võetud proovikehadega, et koostada tootjale sobilik spetsifikatsioon korebetooni jaoks ning samaaegselt määratleda ka ehituses kasutamiseks sobilikud kandevõime tasemed mis võimaldavad kvaliteedikontrolliks kasutada pärast tihendamist (4h, 24h) mõõdetud kandevõime numbreid ja vastavalt saavutatud kandevõime väärtusele otsustada, kas on vajalik laboratoorne survetugevuse katse ja kui ei, kas tohib paigaldada järgmise konstruktsioonikihi ja/või avada katte ehitusaegsele liiklusele. Nii stabiliseeritud segude, korebetooni kui ka nn teerullibetooni puhul võib olla võimalik järgmise kihi paigaldus ja/või liiklusele avamine enne betoonkattel üldjuhul nõutava 7 või 28päevase kivistumise lõppu.

Staatiline koormus

Staatilise koormusega aladel tuleb kasutada tugevdatud konstruktsiooni – eelistatuna tsementstabiliseeritud alust või korebetooni aluses. Staatilise koormusega ala ulatus määratakse igal konkreetsel juhtumil lähtuvalt liikluse jälgimise tulemustest (Transpordiamet), see sõltub konkreetsest liikluslahendusest (näiteks, Tammsaare-Tondi ristmikul Tammsaare teel on staatilise koormuse ala mitmesaja meetrine ulatuses ühelt poolt Pärnu maantee, teiselt poolt Sõpruse puiesteeni – seevastu Haabersti sõlme piirkonnas ei ületa see sadat meetrit). Igal juhul peab tugevdatud konstruktsioon ulatuma ristuva tee/tänavate teisele poole ning tugevdatud ala peab ulatuma stoppjoonest vähemalt 60 m kaugusele koormatud suunas (katendi koormusgrupid A ja B, sõltuvalt raskeliiklusest ka C). Samas, kui koormatud magistraalil tugevdamist mittevajava ala pikkus on piisavalt väike (näiteks, alla 200 meetri) ei ole otstarbekas üleminekuvalade tekitamine vaid tuleks tugevdatud konstruktsiooni kasutada katkematult. Staatilise koormuse ala võib hinnata ka olemasoleva katendi roobaste sügavuse mõõtmisel, eristades stabiilse liikluse ala aeglasest alast. Sel juhul tuleks tugevdatud konstruktsiooni kasutada alal, kus rooba sügavuse kasv staatilise koormuse alal võrreldes tava-alaga on vähemalt 20% koguerisusest.

Üleminekud erinevate tüüpkonstruktsioonide vahel

Sisuliselt saab eristada tüüpkonstruktsioone tavaolukorras ja staatilise koormuse esinemisel. Võttes arvesse ka erineva koormusega teede-tänavate lõikumised, laieneb oluliselt erinevate tüüplahenduste kokkupuuteala. Üleminekulahendused arvestavad järgnevaid põhimõtteid:

- Ülemineku vuugid ehk erinevate konstruktsioonide kontaktpinnad teekonstruktsiooni kihtidel paiknevad nihkes, nihke pikkus ehk ülekatte ulatus peab olema vähemalt meeter, soovitatavalt kaks meetrit
- Üleminekud ei tohi kunagi sattuda rattajälge piki liikumissuunda
- Üleminekuvalas on võimalik kihi paksuse sujuv muutmine kuni kihi tehnoloogilise miinimumpaksuseni, misjärel tuleb teha vuuk täisnurga all
- Üleminekuvalal on soovitatav kasutada geosüntete ülekatttega 2 meetrit kummalegi poole vuugi asukohast

OKTO-killustik

Intensiivse liiklusega teedel kasutada kulumiskindlamat kivimaterjali (A1 ja B2 grupi teede-tänavad), kus on soovituslik Tellijale, asendada nõuetes kulumiskihi looduslikust materjalist toodetud killustik metallurgiašlakist toodetud killustikuga (Okto või analoog), kuid igal konkreetsel juhtumil kontrollida hanke korralduse faasis materjali saadavust soovitud ajaks. Šlakikillustiku parameetrid erinevad veidi

riigis kehtestatud reglemendist (Maanteeameti juhised), seetõttu on käesoleva tööga sätestatud ka soovituslikud nõuded, mis asendavad šlakikillustiku puhul juhised tulenevaid nõudeid. Šlakikillustiku kasutamise positiivset efekti täheldati ka Ülemiste liiklussõlme ehituses (2013), asfaltkattesse roobaste formeerumise kiirus on esimese viie aastaga poole aeglasem. Ühe objekti põhjal ei saa väga täpseid üldistusi teha, siin võib mõjutegureid olla rohkem. Kahtlemata on selline materjal kallim, ka transpordikulud on suurema erikaalu tõttu suuremad, kuid ülakihi pikem tööga kaalub kindlasti üle suuremad ehituskulud.

Roopa areng Tallinna teedel/tänavatel

TTÜ (TalTech) laserskaneerimiste tulemustest seisuga september 2018 (valdavalt 4 aasta aegrida):

	Liiklus	Koormus	Roobas	Staatika	Märkused
Ehitajate-Akadeemia	18,000	1059	5-7 mm	8-10 mm	
Ranna-Muuli	17,000	716	5-7 mm	7-9 mm	
Tartu-Kanali	40,000	2850	6-8 mm	9-11 mm	
Tehnika-Veskiposti	19,000	964	7-9 mm	8-10 mm	
Männiku tee	11,000	732	6-9 mm		
Välja bet. peatustasku	38,000	2248	1-2 mm	5-7 mm	
Nisu bet. Peatus	21,000	1159	3-4 mm		5-6 kesklinna suunal AC
Punane	12,000	1387	5-7 mm		
Tammsaare	61,000	4226	8-11 mm		
Suur-Sõjamäe-Smuuli	6,000	1422	4-6 mm		
Vilde-Akadeemia	16,000	1364	5-7 mm		
Paldiski mnt bet	15,000	1146	3-5 mm		5-6 mm AC kattel (2a)

Tabel 8. Laserskaneerimisega määratud roopasügavused - 4 aasta areng

Tammsaare teel mõõdetud roopasügavus 8-11 mm on väga suure liiklus- ja koormussageduse juures, samas suurusjärgus on roopasügavus näiteks Tehnika/Veskiposti ristmikualas. Siit tulenevalt on šlakikillustiku kasutamine igati õigustatud (roopasügavuse areng üle 3 korra aeglasem).

Asfaldist kulumiskiht betoonteedel

Asfaltkate betoonkonstruktsioonidel omab erinõudeid. Kui seni on (maantee projekterimisnormides) sätestatud kohustuslik asfaltkate miinimumpaksus hüdraulilise sideainega alustel, et vältida põikpragude peegeldumist katte pinnale, siis betoonkatte puhul, kus kogu asfaldist ülakihi funktsioon on kergelt asendatava kulumiskihi loomises ning betoonkattele saetakse vuugid regulaarse intervalliga, on nende vuukide peegeldumine pinnale paratamatus millega tuleb leppida. Et põikpraod plaatide vahel paiknevad regulaarselt fikseeritud plaadipikkuse vahemaaga, on samas vajalik ka vuugitihendite hooldus (regulaarne asendamine) mis eeldab samades asukohtades ja pragusid (vuugivahesid) asfaltkattes.

Oluline aspekt betoonkatte kulumiskihi juures on selle kontakt betooniga. See tagatakse betoonkatte põhjaliku puhastamise ja kruntimisega enne asfaldi paigaldamist. Tänapäevased kogemused Õismäe betoontee katselõigul näitavad, et asfaldi paigaldamisel vahetult betoonkatte ehitusprotsessis enne tee liiklusele avamist on korralik nake võimalik. Analoogilist konstruktsiooni kasutatakse ka Soomes (tõsi, sel juhul oli põhjuseks asjaolu, et betoonkatend oli järelkivinemisel saavutanud survetugevuse, mis välistas algselt kavandatud teemantfreesimise tehnoloogia kasutuse).

Paldiski maantee betoontee katselõigu mõõtmiste järgi on kahe aastaga betoonil tekkinud roobas 3-5 mm, asfaldist kulumiskihil 5-6 mm. Et roopa moodustumine esimesel aastal asfaldil tuleneb suuresti järeltihnemisest, ei saa sellest veel kaugeleulatuvaid järeldusi teha.

Kas betoonkattele kulumiskihiks rajatav asfaldikiht peaks olema SMA või AC surf, vajab veel täpsemaid uuringuid, tänaste teadmiste valguses tuleb eelistada SMA-d parema haardeteguri tõttu. Soome ja Rootsi uurijad on samas asetanud kahtluse alla üldise SMA-eelistuse, mis võib olla seotud naastrehvide laialdase kasutusega, väidetavalt on lamellrehvil AC surf kattel parem nake.

Kuna roopa teke kattesesse seondub kolme faktoriga – esmalt, järeltihnemine koormuse all (esimese aasta jooksul), seejärel raskeliikluse mõjul asfaldi nihkumine sõidujäljest kõrvale eriti soojemate temperatuuridega (asfaldi elastsusmoodul on otseses seoses temperatuuriga, paremini arvestatud näiteks Taani katendiarvutusjuhises) ja kulumine naastrehvide kasutusest. Üldistatult võib hinnata nihke ja kulumise mõju ligikaudselt võrdsena ning hüdraulilise sideaine kasutamine teekatendi side- ja aluskihtides võimaldab peaaegu elimineerida nihkepingetest tuleneva deformatsiooni. Seetõttu on oluline ka asfaltkatte paksuse hoidmine minimaalsena.

Väga õhukeste asfaldikihtide kasutusele on siiski kaks piirangut – ühelt poolt, paigalduse tehniline miinimumpaksus mis sõltub kivimaterjali max terasuurusest, teiselt asjaolu et naastrehvide olulise osakaaluga kaasneb suurema liiklussageduse juures vältimatult kulumine, peab kulumiskihi paksus siiski tagama kihile vajaliku eluea. Tõenäoliselt on väga õhukeste kihtide puhul võimalik kasutada minimaalseid poorsusnäitajaid, mis aitab kaasa ka kihi eluea pikendamisele kuna võimalik vee kogus, mis mahub kihi pooridesse, on väike.

Väiksema koormusega teedel-tänavatel ei pruugi märgatavat/mõõdetavat roobast tekkida ka katendi tööea jooksul, ressursi määrab sideaine vananemine.

Kergliiklusteed

Linnatänavate standardis EVS 843:2016 on toodud kaks võimalikku kergliiklustee konstruktsiooni, aladel kus sõidukid ei liigu kergliiklusteel, tohib kasutada 15 cm killustikukihti, muudel juhtudel peaks killustikukiht olema vähemalt 20 cm. Samas tuleb järgida ka seda, et aladel, kus kasutatakse õhemat killustikukihti, tuleb kasutada ka kergemaid hooldussõidukeid (täismass mitte üle 6 tonni). Esineb üksikuid alasid, kus kergliiklusteele on formeerunud roopad just hooldussõiduki rattajälge. Tõenäoliselt tuleb jälgida ka hooldussõiduki valikul rehvisurvet, soovitada tuleks sõiduautodel levinud taset 2-2,5 MPa, mitte raskesõidukite rehvirõhku 8-9 MPa. See kergliiklustee konstruktsioon kehtib eeldusel, et aluspinnasena esineb mittetolmne liivpinnas, sel juhul puudub vajadus täiendava drenliiva kihi kasutamiseks. Juhul, kui aluseks on savine pinnas, tuleb kasutada eristavat geotekstiili ja selle peale liivast kaitsekihti. Dreenivas funktsioonis toimib killustikukiht, seega liiva filtratsioon ei ole oluline, küll tuleb kontrollida liiva peenosiste sisaldust mis määratleb materjali külmakindluse.

Geosünteedide peatükis on teemat laiemalt kirjeldatud, geosünteedi kasutusega kaasneb ehitusprotsessis mõõdetava kandevõime kadu ja sellega tuleb arvestada kvaliteedikontrolli protsessi planeerimisel projektis. Kas geosünteedide kasutusega on võimalik saada olulist efekti ka nõrgematel aluspinnastel, näitab katseobjekt, kus geovõrgu ja geokanga kasutusega on rajatud kergliiklustee nõrgematele pinnastele ilma aluspinnaseid asendamata (ka ilma liivakihita).

1.7. Kergseadmete kasutusvõimalus kvaliteedikontrollis

Plaatkoormuskatse ja Zorn LWD võrdlus seondub erinevate pinnastega – seosed on veidi erinevad. Saksamaal kasutatakse Zorn-tüüpi seadmeid üldjuhul baaskonfiguratsioonis 100 kPa režiimis 300 mm tallaga ning võrdlustasemed on antud erinevates normdokumentides, seega võib võrdlust lugeda usaldusväärseks. Vennapusa doktoritöös (2008) on analüüsitud muuhulgas Zorni ja plaatkoormuskatse seost ja leitud korrelatsioonikordaja r^2 väärtuseks E_{v1} suhtes 0,66 ja E_{v2} suhtes 0,40 mis ei ole just liiga kõrge.

Zorni ehk Saksa koolkonna LWD seadmete võrdlust Taani koolkonna seadmetega (Dynatest, Prima) on tehtud erinevates riikides ja alati ei ole täpselt dokumenteeritud kasutatud režiimi. Näiteks USA-s on valitud mõlemal seadmel võrdluseks 200 mm tald ning kohati ei ole fikseeritud pingerežiimi. Siekmeier (2009, Minnesota) annab nõu, et kui LWD mõõtmistel viimase 3 katse jooksul mõõtmistulemus (kandevõime väärtus) tõuseb enam kui 10%, on tihendamine puudulik.

Pavana Vennapusa on oma doktoritöös (Iowa, 2008) kasutanud Zorni (GDP – German Dynamic Plate) jaoks üldistust $E_{LWD-Z} = 0,45 \dots 0,56 E_{v2}$, vahemikus 45...120 MPa on Saksa allikate järgi kasutatav suhtarv 0,50 (esineb ka 0,56 väärtus) kuid hoiatatakse, et erinevate pinnaste puhul ja eriti väljaspool antud piirkonda võib suhe olla erinev. Hildebrand (2003) näitab kruusase moreenliiva jaoks Taani koolkonna seadmete seoseks $E_{Keros} = 1,22 * E_{Loadman}$ ja $E_{Keros} = 1,97 * E_{Zorn}$. Keros on Taani koolkonna esimene seade millel tuginevad nii Prima kui Dynatesti uuemad seadmed, mistõttu tulemused on üldistatavad ka järgmistele mudelitele. Vennapusa oma katsete järgi hinnati $E_{Keros} = 1,75 * E_{Zorn}$ (200 mm plaadiga) ja $E_{Keros} = 2,16 * E_{Zorn}$ (300 mm plaadiga), $E_{Dynatest} = 1,70 * E_{Zorn}$ (200 mm plaadiga).

Uuematest andmetest Tirado jt. (2015) on saanud Dynatesti ja Zorni seose väga hea ($R^2 = 0,99$) valemiga $E_{dyn} = 1,65 * E_{zorn}$ ja seda on tõenäoliselt otstarbekas ka Eestis kasutada. Heathcote (2016, LAV) kirjeldab teoreetilisi aluseid ja pakub Dynatest LWD jaoks välja otsese seose $E_{v2} = 0,69 * E_{lwd} + 20,9$ mille juures nende teostatud katsete korrelatsioon oli kõrge - $r^2 = 0,94$. Arvutustes on kasutatud Poissoni teguri väärtust 0,5 (see on Zorni puhul konstant ja võimalik, et valik on tehtud võrreldavuse huvides). Heathcote soovitas kasutada Dynatesti suuremate taldadega nii kaua, kuni deformatsioon on vähemalt 35 mikronit – võrreldes Saksa koolkonna seadmetega on Taani koolkonna seadmete andurid oluliselt tundlikumad mis võimaldab võrrelda ka seotud kihtidega konstruktsioone.

Kuni me pole Eestis teinud piisavas mahus erinevate seadmete võrdluskatseid, on mõistlik juhendada lihtsamast seosest, mis tuleneb Saksa ja Taani seadmete konstruktiivsetest erisustest (Poissoni tegur vastavalt 0,5 ja 0,35 ning plaadi kujutegur vastavalt 1,0 ja 0,79) ja siit tulenevalt kasutada seost – $E_{zorn} = 0,67 * E_{dynatest}$ ehk $E_{dynatest} = 1,5 * E_{zorn}$. Juhindudes eeltoodud Ühendkuningriigi seostest, on tabelis toodud väärtused kontrolli aluseks ja ei tulene arvutustest vaid on mõõtmise keskväärtuse baas. Seega, **LWD mõõtmistel peab viie viimase mõõtmise libisev keskmine olema vähemalt tabelis toodud AVG väärtus ning ükski mõõtmistulemus ei tohi olla väiksem kui tabelis toodud MIN väärtus. Analoogselt PLT katses, ei tohiks ükski tulemus olla väiksem kui 80% tabelis toodust.**

Ev2 – PLT	180	150	120	100	80	70	60	50	45
Evd – Dynatest@100 kPa-AVG	132	115	99	82	66	58	50	45	41
Evd – Dynatest@100 kPa-MIN	106	92	79	66	53	46	40	36	33

Tabel 9. Plaatkoormuskatse (Ev2) ja Dynatest LWD kandevõimevõuete võrdlus

Et plaatkoormuskatse on aja- ja ressursinõudlik, siis tuleks juhinduda Saksa normidest tulenevast reeglist, mille järgi alusel teostatakse objektil 6000 m² kohta üks plaatkoormuskatse (iga alustatud 250 meetrise lõigu kohta olema vähemalt üks) või 600 m² kohta üks kergseadme (LWD) katse.

Kui katse tulemusena tabelis näidatud väärtust ei saavutata ning tegemist on lokaalse puudujäägiga, on tõenäoliselt tegemist materjali mittehomoogeensuse või puuduliku tihendamisega. Kui erisused ei ole lokaalse iseloomuga, tuleks teostada võrdluskatse plaatkoormuse seadmega.

- 1) Plaatkoormuskatsega määratakse E_{v1} ja E_{v2} (E-plt1) ning arvutatakse välja nende suhe. Juhindudes Soome normidest (InfraRYL) kontrollitakse, kas suhtarv mis näitab tihendamise kvaliteeti, on piisav.
- 2) LWD seadmega tehakse mõõtepunkti lähialal (1...5 m raadiuses erinevates suundades) vähemalt neli katset.
 - a. Kui need nelja mõõtmise tulemused erinevad keskväärtusest (E-lwd1) vähem kui Δ (20%), on tegemist homogeense kohaga
 - b. Kui üksikmõõtmised erinevad keskväärtusest rohkem kui Δ , mõõdetakse järgmised neli, arvutatakse kaheksa katse keskmine ning eemaldatakse valimist ekstreemsed väärtused (max, min). Arvutatakse valimisse jäänud kuue keskmine (E-lwd1)
- 3) Saadud LWD keskväärtust (E-lwd1) võrreldakse plaatkoormuskatse tulemusega (E-plt1). Kui tulemus erineb eeltoodud tabeli järgi vähem kui Δ plaatkoormuskatsele vastavast tasemest, puudub vajadus võrdlustabeli korrigeerimiseks.
- 4) Kui erinevus on üle Δ , tehakse teine plaatkoormuskatse teises asukohas. Teise plaatkoormuskatse tulemustega korratakse P1...P3 protsessi ja leitakse vastavalt E-lwd2 ja E-plt2. Kui saadud LWD keskväärtusele vastav E_{v2} katsel erines vähem kui Δ plaatkoormuskatsel saadud tulemusest, puudub vajadus võrdlustabeli korrigeerimiseks (esimene plaatkoormuskatse sattus halba kohta).
- 5) Kui teise plaatkoormuskatse tulemus (E-plt2) ja LWD keskväärtus (E-lwd2) ei ole tabeli järgi vastavuses ning esimese ja teise plaatkoormuskatse tulemused ei erine omavahel üle 20%, võetakse LWD tulemuste teisendamiseks E_{v2} tasemele kasutusele suhte keskväärtus $(E-plt1+E-plt2)/(E-lwd1+E-lwd2)$.
- 6) Kui E-plt1 ja E-plt2 erinevad omavahel enam kui 20%, on tegemist mittehomoogeense alaga ja tuleb teha kolmas plaatkoormuskatse ning võrdlusest eemaldada keskmisest kõige rohkem erinev tulemus ning arvutatakse uus taandustegur vastavalt eelmises punktis sätestatule.

Kui eelkirjeldatud protsessis on veendunud, et LWD tulemused on vastavuses plaatkoormuskatse tulemustega või on leitud uus taandustegur ja sellele vastavalt vajalikud tasemed LWD jaoks, mis kirjeldavad libiseva keskmise ja miinimumväärtuse, jätkatakse tööd LWD seadmega tagades mõõtetiheduse vähemalt 1 punkt 600 m² kohta.

Venemaal on välja töötatud uus standard (kavand) teekonstruktsiooni sidumata kihtide deformatsusnäitajate kontrolliks¹¹ (standardikomitee TK 418 grupp) - see on läbinud kooskõlastusringi kuid ei ole veel kehtestatud. Siin nähakse ette plaatkoormuskatse kasutamine sidumata kihtide kvaliteedikontrollis sagedusega vähemalt 5 punkti objektil ja vähemalt punkt 100 meetri kohta ja/või kergseadme kasutus 100 kPa pingel, sagedusega 3 punkti ristlõikes iga 50 meetri

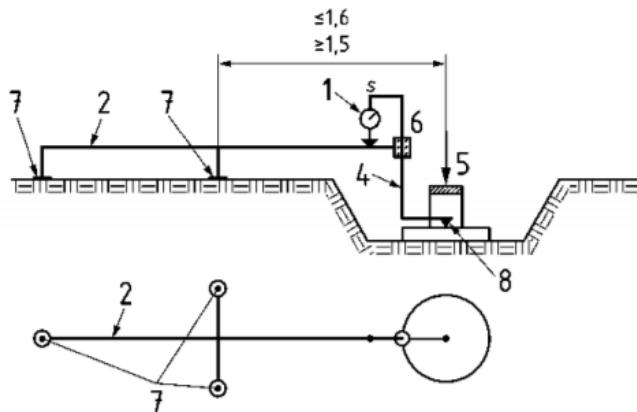
¹¹ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕФОРМАТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ИЗ НЕСВЯЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА.

kohta ja vähemalt 30 punkti objektil et määrata objekti homogeensus (suhtelise hälbe piirid 12% või 18% vastavalt alusel ja muldkehal/liival). Valdavalt on kopeeritud Saksa norme, kuid lisatud on oluline aspekt – plaatkoormuskatsel liival ja muldkehal kasutatakse 300 mm talda kuid ainult 50% koormustasemeid standardiga võrreldes.

Kui Inspector/Loadman seadmete kasutust õpetatakse ja teadmisi värskendatakse omanikujärelevalve koolitustel, siis ilmselt on vajadus koolitusprogrammi käigus tutvustada ka teisi seadmeid (selleks on Teede Tehnokeskusega ka vastav kokkulepe). Käesoleva juhise koostamise hetkel on Eestis kaks Dynatest LWD seadet. Kokkuleppel seadme maaletoojaga korraldatakse uue seadme kasutuselevõtul vastutavale kasutajale koolitus (kas Dynatesti poolt Taanis, vastava õppevideoga või T-Konsult OÜ poolt Eestis). Tulemuste tõlgendamise õigus on ainult vastutaval kasutajal.

1.8. Kandevõime mõõtmise juhendid

Plaatkoormuskatse teostamise juhend



1 Instrument siirde mõõtmiseks

2 Tugiraam

4 Kontaktvarras koos kannaga

5 Koormus

6 Liuglaager

7 Tugijalg

8 Nõel

Joonis 2. Väljavõte standardist DIN 18134:2012 (EVS 934:2016)

Tehakse kindlaks vajalik maksimaalne koormus ja/või maksimaalne vajalik siire

tulenevalt katse eesmärkidest, pinnase omadustest ja kasutatavast talla suurusest. 300 mm diameetriga plaat on teedehituses kasutamiseks sobilik - pinget talla all tõstetakse kuni $0,5 \text{ MN/m}^2$ -ni või kuni saavutatakse siire 5 mm mis juhul loetakse maksimaalseks pingeks sellel hetkel mõõdetud pinge.

Katsekoha ettevalmistamine

Mõõtmiseks kasutatavast tallast tulenevalt valmistatakse ette piisavalt suur ala (katsekoht) kuhu koormustald paigutatakse. Selleks eemaldatakse lahtine materjal ja silutakse katsetatava kihi/materjali pealispind, et tagada selle ühtlane kokkupuude koormustallaga. Liivpinnastel tuleks pealispinnalt eemaldada läbikuivanud ja lahtine materjal, savikatel materjalidel kuivanud kõva kiht (kuni 30 cm). Kui ühtlast pinda silumisega ei saavutata tuleb kasutada õhukest tasandavat liivakihti (kuiv keskliiv mitte rohkem kui mõni millimeeter) katsekohal, mis tagab pinge ühtlase jagunemise talla all.

Seadme õige paigaldamine katsekohale

Koormustald paigaldatakse mõõdetavale pinnale nii, et tagatakse kogu talla ühtlane kokkupuude mõõdetava materjali/kihiga. Selleks tuleb talda suruda ja edasi tagasi liigutada või keerata. Plaat peaks jääma võimalikult horisontaal asendisse. Oluline on jälgida siinkohal, et vasturaskuse toetuspunkt teekonstruktsioonile (nt kasutatava ehitusmasina ratas, lint või pinnale toetuv tööorgan) ei oleks tallale lähemal kui standardis on lubatud (300 mm talla puhul 0,75 m).

Koormustalla keskele asetatakse hüdrauliline koormamise seade (koos koormussensoriga). Koormamise seade peab jääma vasturaskuse ja koormusplaadi vahele sirgelt ning välistada tuleb selle nihkumine toetuspindade suhtes. Kogu süsteem peab olema paigutatud nii, et see oleks stabiilne kogu katse vältel.

Siirde mõõtmiseks kasutatakse mõõteseadet mida on kujutatud Joonis 2. Lugem võetakse tugiraami suhtes vabalt liikuva ja koormustalla keskele toetatud mehhanismi abiga. Tugiraami ei tohi toetada

vasturaskuse toetuspunktile lähemale kui 1,25 meetrit ja tugiraami toetusjalgade ning koormusplaadi tsentri vaheline kaugus peab olema vahemikus 1,5 – 1,6 meetrit (vt joonist).

Peale seadme paika seadmist veenduda, et kontaktvarras on vertikaalasendis ja liigub liuglaagris vabalt. Kand ei tohi talla või mõõtetunneliga kokku puutuda, plaadiga on ühendatud ainult nõela ots mis on paigutatud plaadi keskele. Mõõtmise ajal tuleb vältida vibratsioone mis mõjutavad seadet (ehitusmasinad, tugev tuul).

Katse teostamine

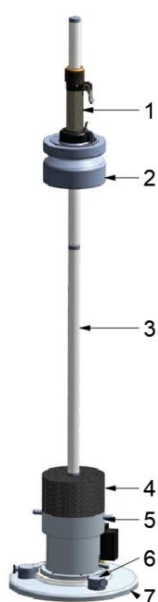
Enne katse alustamist antakse seadmele eelkoormus mis on 300 mm ja 600 mm talla puhul 0,01 MN/m² või 0,005 MN/m² kui kasutatakse 762 mm talda. Peale vähemalt 30 sekundi möödumist nullitakse siirde lugem.

E_{v1} leidmiseks koormatakse talda kuues etapis kus igas etapis lisatakse sama palju koormust. Koormuse tõstmine peab toimuma kiiremini kui 1 minut. Koormusest vabastatakse tald kolmes etapis: 50%, 25% ja 2% maksimaalsest koormusest. Järgnev E_{v2} koormustsükkel on eelnevale sarnane kuid koormust tõstetakse ainult eelviimase koormustasemini (maksimaalse koormuseni ei jõuta).

Koormust tõstes/langetades peab olema möödunud eelmise etapi koormuse saavutamisest 60 sekundit (*60 sekundit kehtib tee aluse mõõtmise puhul, muul juhul kehtib 120 sekundit*) enne kui alustatakse uut etappi. Iga etapi lõpus fikseeritakse talla siire.

Kui katse ajal juhtub midagi mitteootuspärast (plaat vajub kiirelt pinnasesse või kaldub) tuleks pinnas plaadi alt lahti kaevata kuni plaadi diameetri sügavuseni ja kui leitakse pinnases ebahomogeensusi tuleb see protokollis märkida.

Kergdeflektomeetriga mõõtmise juhend



Käesolev juhend käsitleb Taani koolkonna seadmete kasutust (Keros, Dynatest LWD, Prima 100) kandevõime mõõtmiseks. Võimalik on kasutada ka Saksa koolkonna seadmeid (Zorn, HMP, Terratest) kuid nende puhul ei ole pingerežiim vabalt varieeritav (fikseeritud 100 kPa). Soome koolkonna seadmed (Loadman, Inspector) on mõeldud tihendamise kvaliteedi hindamiseks ja nendega ei saa kandevõimet mõõta pingerežiimi mittevastavuse tõttu.

- 1 Käepide koos langeva raskuse päästikuga
- 2 Langev raskus
- 3 Juhtvarras
- 4 Puhver
- 5 Koormussensor
- 6 Dual Plate süsteemi lukk
- 7 Koormustald

Joonis 3. Kergdeflektomeetri (LWD) konstruktsioon Dynatest LWD näitel

Millist seadistust valida?

Selleks, et tulemusi otseselt arvutuslikega võrrelda, tuleks pingerežiim valida vastavalt mõõdetava kihi asukohale konstruktsioonis:

- Alusel: 200 – 300 kPa
- Aluse all: 100 – 200 kPa
- Tugeval aluspinnasel 50 – 100 kPa
- Nõrgal aluspinnasel 10 – 60 kPa

Kuna Dynatesti sensor on tundlik ja mõistlik on kasutada maksimaalset talla suurust (eesmärk on kandevõime mõõtmine, mitte konkreetse materjali elastsusmooduli või tihendusteguri), siis kokkuleppeliselt kasutame 100 kPa või sellele lähedast režiimi, see tagab tulemuste parema ühildumise Saksa LWD (Zorn etc) kaudu leitud seostega plaatkoormuskatsega. Vajaliku pinge saavutamiseks tuleb esmalt tõsta koormust (kuni 20 kg-ni) ja alles siis, kui sellest ei piisa, minna üle väiksemale tallale. Kandevõime mõõtmistäpsuse ja tulemuse korratavuse tagamiseks peab mõõdetav deformatsioon (deflection) olema vähemalt 35 mikronit (0,035 mm).

Katsekoha ettevalmistamine

Mõõtmiseks kasutatavast tallast tulenevalt valmistatakse ette piisavalt suur ala (katsekoht) kuhu koormustald paigutatakse. Selleks eemaldatakse lahtine materjal ja silutakse katsetatava kihi/materjali pealispind, et tagada selle ühtlane kokkupuude koormustallaga. Liivpinnastel tuleks pealispinnalt eemaldada läbikuivanud ja lahtine materjal, savikatel materjalidel kuivanud kõva kiht. Kui ühtlast pinda silumisega ei saavutata võib kasutada seadmele komplekti kummist tasandusketast või õhukest tasandavat liivakihti, mis tagab pinge ühtlase jagunemise talla all.

Seadme paigaldamine katsekohale

Seade paigaldatakse katsekohale võimalikult vertikaalses asendis (max 5% kalle) ja parema kontakti saamiseks materjaliga võib seadet pöörata edasi tagasi katsekohal. Kui planeeritakse katsetamist erinevate pingerežiimidega siis tuleb esmalt sooritada katsed madalal pingerežiimil (Dynatest - Dual Plate System).

Katse teostamine

Esmalt kontrollida kas Bluetooth ühendus on olemas seadmega kuhu andmed saadetakse. Veenduda et kasutatakse õigeid puhvreid. Seejärel astuda ühe jalaga seadme talla serva peale, et seade oleks edasiste toimingute ajal stabiilses asendis. Raskus tõstetakse üles ja lukustatakse käepideme külge. Seadme küljel asuvat väikest hooba alla vajutades tsentreeritakse talla keskel olev andur - geofoon (tsentreerimist korrata iga kord kui seade nihkub). Haarata käepidemest ja olles veendunud, et raskuse langemise trajektoor on vaba, võib raskuse käepidemest lahti päästa. Käepidemest tuleb tugevalt kinni hoida niikaua kuni raskus on põrkamise lõpetanud. Tulemused peaksid kohe ühendatud seadmes kajastuma. Protsessi kiirendamiseks tohib raskuse ka kinni püüda enne korduvpõrget.

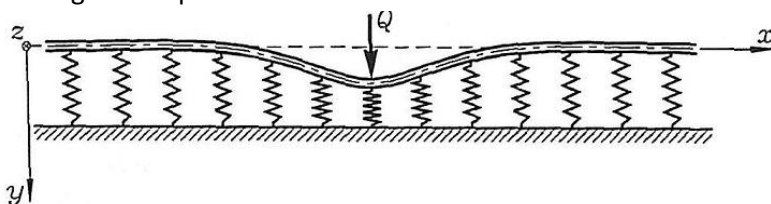
Tavaliselt sooritatakse ühel katsekohal vähemalt 6 korduskatset, millest esimesed 3 tehakse sängituse eesmärgiga ja viimase kolme katse järgi saadakse tulemus (keskväärtus). Sängituslöövide arv võib muutuda olenevalt olukorrast, kuid kehtib reegel, et kui deformatsioonid ei tõuse eelneva mõõtmisega võrreldes üle 10% ei ole täiendavate sängituslöövide tegemine vajalik. Enamasti viitab rohkem kui kolme sängituslöögi vajadus kas materjali vähesele tihedusele või on plaadi kontakt pinnasega kehv.

2. Tsementbetoonkatendid (betoontee, bussipeatused)

2.1. Teekatendi aluskonstruktsiooni turbeteguri (sängitusmooduli) K määramine

Jäikade teekatete s.h. tsementbetoonkatete dimensioneerimine põhineb elastsele alusele toetuva tala(plaadi) arvustusteooriale. Aluseks nimetatakse keskkonda, millele toetub teekate. Alusele toetuvale konstruktsioonile (tsementbetoonplaadile) mõjuvad välisjõud tasakaalustatakse aluse reaktsioonjõudude – aluse turbe – poolt. Tsementbetoonist teekatete projekteerimisel on üheks olulisemaks sisendnäitajaks aluse kandevõime. Liikluskoormuse mõju betoonplaadile ja alusele illustreerib nn. Wrinkleri vundamenti mudel. (Söderqvist, 2006) (Joonis 4).

Alust võime kujutleda lõpmata hulga elastsete tugede koguna, kusjuures üksikute tugede vahekaugus on lõpmata väike.



Joonis 4. Wrinkleri vundament.

Elastse aluse turbe talale (ühiklaiusega plaadile) on võrdeline ja vastassuunaline tala siirdega (Q – rataskoormus) ning mõju kirjeldatakse valemiga:

$$\text{Turbejõud } R = K \times v \quad (2)$$

kus K on turbetegur ja v siire.

K iseloomustab aluskonstruktsiooni jäikust. Teedehituse igapäevases praktikas kasutatakse aluse kandevõime määramiseks E –moodulit. E –moodul määratakse ehitusplatsil erinevate seadmete ja põhimõtete alusel. Üleminekul turbetegurile K on vaja rakendada järgmisi seoseid:

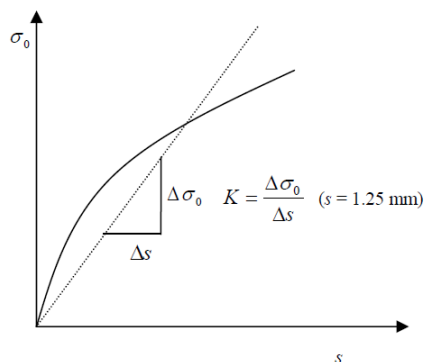
Turbeteguri K määramine plaatkoormuskatsega (või LWD seadmega).

Mitteseotud alusmaterjalid - plaatkoormuskatsega leitakse deformatsioonimoodul E_{v2} .

K arvutatakse järgmiste seoste abil (Joonis 5.):

$$K = \frac{\sigma_0}{s} \quad (3)$$

kus σ_0 – keskmine normaalpinge koormusplaadi all; S – koormusplaadi vajum.



K ja E_{v2} suhe on võimalik kirjeldada valemis:

$$K = \alpha_1 \cdot E_{v2} \quad (4)$$

kus:

- E_{v2} – deformatsioonimoodul MPa;

- K – turbetegur MN/m^3

- α_1 - üleminekutegur m^{-1}

(üleminekuteguri α_1 väärtus on 1,1).

Joonis 5. Turbeteguri K defineerimine (Kim, Park, 2011)

FWD abil seotud materjalikihtide E-mooduli E_d määramine.

Turbetegur K-väärtus sõltub aluskonstruktsiooni elastsusmoodulist E_s (staatiline). Samuti mõjutab aluse vastureaktsiooni suurust betoonplaadi enda jäikus. Pinge ja vajumi vaheline seos väljendub valemis (Kim, Park, 2011):

$$E_s = \frac{\pi \sigma_s r}{2s} (1 - \nu^2) \quad (5)$$

kus:

- E_s – staatiline elastsusmoodul,
- σ_s – keskmine normaalpinge,
- r – koormusplaadi raadius
- s – koormusplaadi vajum,
- ν – Poisson'i tegur .

E_s ja E_d vaheline seos on välja toodud P.Sürje uurimistöös (Sürje, 1994):

$$E_s = 1,34 \cdot E_d^{0,88} \quad (6)$$

kus:

- E_s – staatiline elastsusmoodul,
- E_d – FWD-ga mõõdetud E-moodul.

Edasi on võimalik välja tuua

$$K = \alpha_2 \cdot E_s \quad (7)$$

kus:

- E_s – aluskonstruktsiooni staatiline elastsusmoodul ,
 - α_2 – üleminekutegur m^{-1}
- (üleminekuteguri α_2 väärtus on 1,85).

Turbeteguri normväärtus on 160 MN/m³.

2.2. Betoonkatte arvutus (näidis)

Arvutus tugineb Hollandi juhisele¹²
(variant: C35/45 tg 0,06)

$f_p = [(1600 - h)/1000] * f_{tl}$	5,4914	Betoonplaadi arvutuslik paindepinge
$f_{tl} = 1,3 * [1,05 + 0,05 * (f_k + 8)] / 1,2$	4,008333333	Betooni tõmbepinge
$f_{kl} = f_k + 8$	53	Betooni survetugevus lühiajalise koormuse puhul
$I = (E_c * h^3 / 12 * (1 - N_{\bar{u}}^2) * k)^{0,25}$	755,8825	Betoonplaadi suhteline jäikus raadius
$P = (1 - W/200) * P_{act}$	53625	Redutseeritud rataskoormus
$S_k = [3 * (1 + N_{\bar{u}}) * P / (\pi * (3 + N_{\bar{u}}) * h^2)] * [\ln(E_c * h^3 / (100 * k * a^4)) + 1,84 - (4/3) * N_{\bar{u}}] + (1 - N_{\bar{u}}) / 2 + 1,18 * (1 + 2 * N_{\bar{u}}) * a / I$		
S_k	2,1223879	Paindepinge rataskoormusest
$S_{ma} = S_{tl} + S_k$	3,3372583	Maksimaalne väsimuspinge
$S_{mi} = S_{tl}$	1,214870	Minimaalne väsimuspinge
$\log N_i = 12,903 * (0,995 - S_{ma} / f_p) / (1 - 0,7525 * S_{mi} / f_p)$		
$\log N_i$	5,9950770	
N_i	988728,4748	
$S_{tL} = 1,8 * 10^{-5} * [(L_1)^2 / h]$	1,214870	Pinged temperatuurigradiendist pikiservas
$S_{tw} = 1,8 * 10^{-5} * R * [(W_1)^2 / h]$	0,400179	Pinged temperatuurigradiendist põikservas
$L_1 = L - 2/3 * C$	3939,968	Plaadi kandeava pikiservas
$W_1 = W_0 - 2/3 * C$	3189,968	Plaadi kandeava põikservas
$C = 4,5 * v / (h / k * dt)$	840,049	Plaadi toetuspikkus
$y = R_y - 1/3 * C$	469,984	
$R = 4 * y * (W_1 - y) / W_1^2$	0,503	
$n_i = K_g / 100 * K_r / 100 * N_0$	920000,000000	
$n_i / N_i \leq 1$	0,9304880	

OK

Nimetus	Tähis	Väärtus	Ühik
Betooni lineaarne soojuspaisumistegur	A	0,00001	°C ⁻¹
Ratta jälje raadius	a	185	mm
Temperatuuri gradient	dt	0,06	°C/m
Betooni elastsusmoodul	E _c	34000	N/mm ²
Betooni kuubiksurvetugevus	f _k	45	N/mm ²
Plaadi paksus	h	230	mm
Temperatuuri gradiendi esinemistõenäosus	K _g	5	%
Rattajälje asukoha tõenäosus sõidurajal	K _r	80	%
Aluse turbetegur	k	0,11	N/mm ³
Plaadi pikkus	L	4500	mm
Lubatud normtelgede arv antud plaadi punktis	N _i		tk
Tegelik (tõenäoline) normtelgede arv punktis	n _i		tk
Poissoni tegur	N _ü	0,2	
Teeressurss (normteljed)	N ₀	23000000	
Liiklusloenduse alusel saadud normteljed	N ₁	0	
Rataskoormus	P _{act}	65000	N

kulum+2cm variant 1

¹² Alus: CT4860 Structured Design of Pavements, Ir.L.J.M. Houben, Part IV - Design of Concrete Pavements, January 2009

Ratta jälje keskpunkti kaugus plaadi pikiservast	Ry	750	mm
Koormuse ülekandetegur	W	35	1/100
Plaadi laius	W ₀	3750	mm

vaba pikis.

Betoonplaadi arvutamisel kasutatakse järgmiseid kriteeriume:

1. Rataskoormus veereb piki betoonplaadi vaba äärt ja asetseb plaadi serva keskel (0,5L plaadi põikvuugist). Paiknemise tõenäosus $K_r = 80\%$ liikluse esinemise kogumahust. OK

2. Rataskoormus veereb piki betoonplaadi pikivuuki ja asetseb plaadi serva keskel (0,5L plaadi põikvuugist). Paiknemise tõenäosus $K_r = 20\%$.

3. Rataskoormus asetseb põikvuugi ees plaadi keskel (kaugus pikivuugist $0,5W_0$). Paiknemise tõenäosus $K_r = 50\%$ liikluse kogumahust.

L - plaadi pikkus; W_0 - plaadi laius

4. Koormuse ülekandetegurid W vuukides (või vabal äärel) paindepingete arvutamiseks

4.1 Betoonplaadi vaba äär $W = 35\%$ OK

4.2 Betoonplaadi ankurdatud pikivuuk $W = 70\%$

4.3 Betoonplaadi tüübeldatud põikvuuk $W = 75\%$

Temperatuuri gradient dt määratakse valemiga:

$dt=(T_t - T_b)/h$		0,06	
Nimetus	Tähis	Väärtus	Ühik
Temperatuuri gradient	dt		°C/mm
Temperatuur betoonplaadi ülemisel pinnal	T_t	35	°C
Temperatuur betoonplaadi alumisel pinnal	T_b	20	°C
Plaadi paksus	h	250	mm

Arvesse tulevad ainult positiivsed temperatuuri gradiendid

Kasutame temperatuurigradiente

1. $0,06\text{ °C/mm}$ esinemistõenäosus $K_g = 5\%$

2. $0,04\text{ °C/mm}$ esinemistõenäosus $K_g = 20\%$

Alus: Tallinna mõõtmised 2016-2018

Pinged soojuskoormustest St_l ja St_w arvutatakse Eisenmann'i (1979) valemite alusel.

3-5 cm asfaltbetooniga kaetud betoonplaadi puhul korrigeerime temp.gradienti teguriga 0,8.

Pinged rataskoormusest Sk arvutatakse Westergaardi revideeritud valemite abil.

Betoonplaadi dimensioneerimise aluseks on Palmgren-Miner väsimuskoormus tingimus $n_i/N_i \leq 1$.

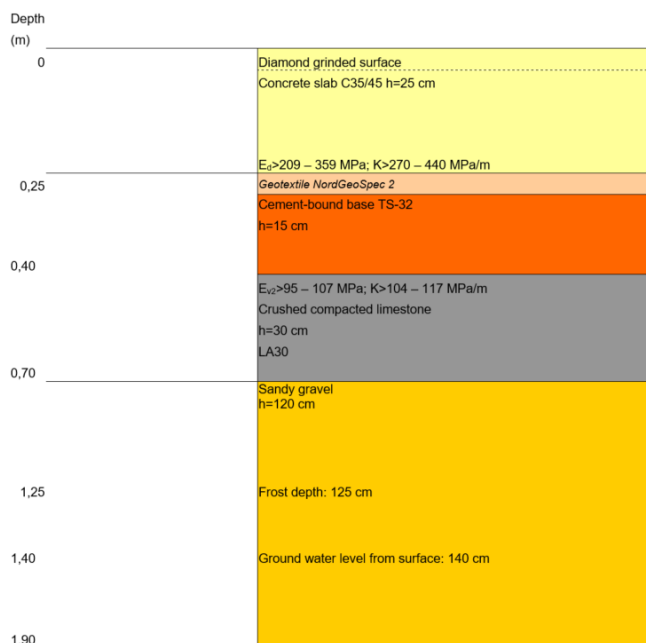
n_i - tegelik (tõenäoline) rataskoormuse maht(normtelgedes) betoonplaadi antud punktis, tõenäoliselt esineva temperatuurigradiendi korral.

N_i - arvutuslik lubatud rataskoormuse maht(normtelgedes) betoonplaadi antud punktis antud temperatuurigradiendi korral.

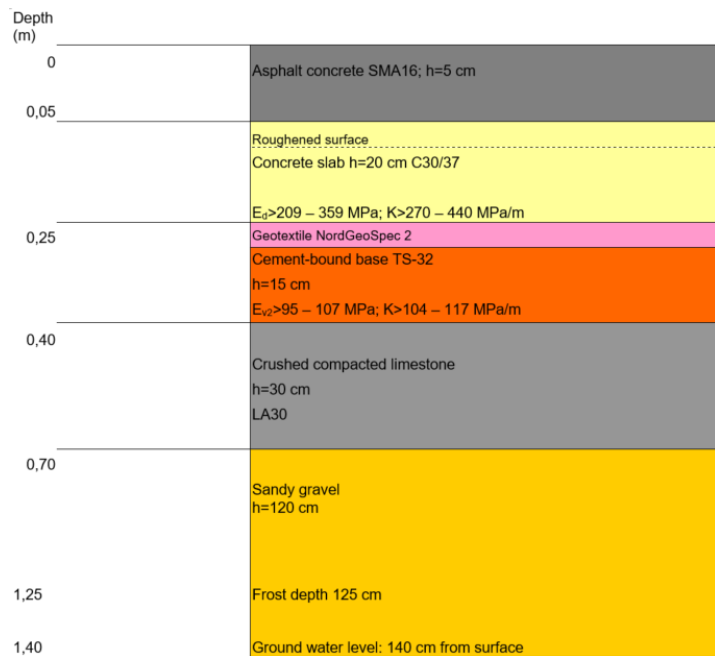
2.3. Betoonkatendite variandid. Paldiski mnt katselõik

Illustratsiooniks on alljärgnevalt toodud Tallinnas Paldiski mnt tsementbetoonkatselõigu ehitamisel 4 erineva konstruktsiooni tüübi mõõdetud E_d ja E_{v2} tulemused ja sellele vastavad turbeteguri K väärtused.

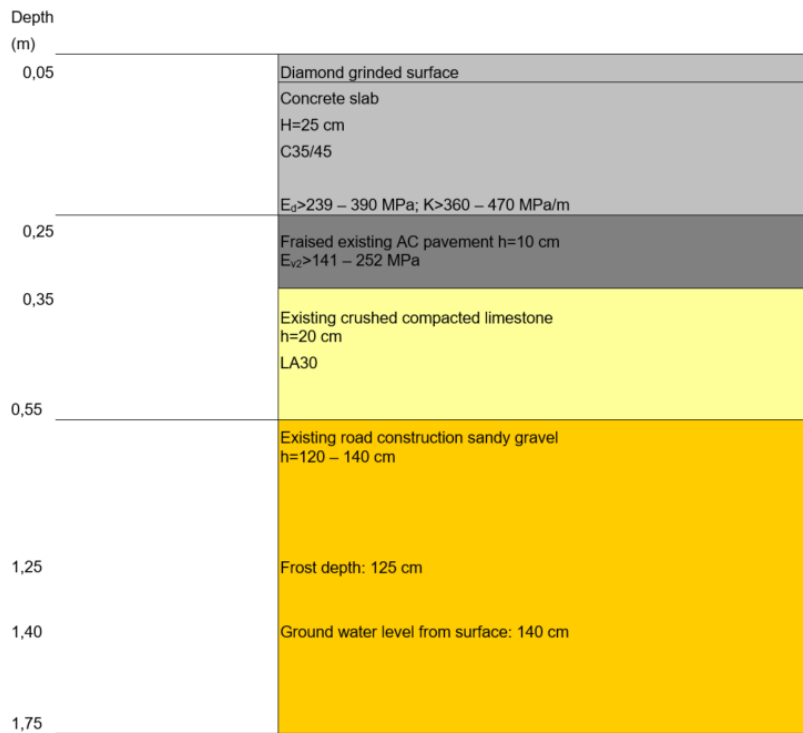
Turbeteguri K väärtus jääb vahemikku 270-470 MN/m³, mis ületab normatiivset 1,5-3 korda.



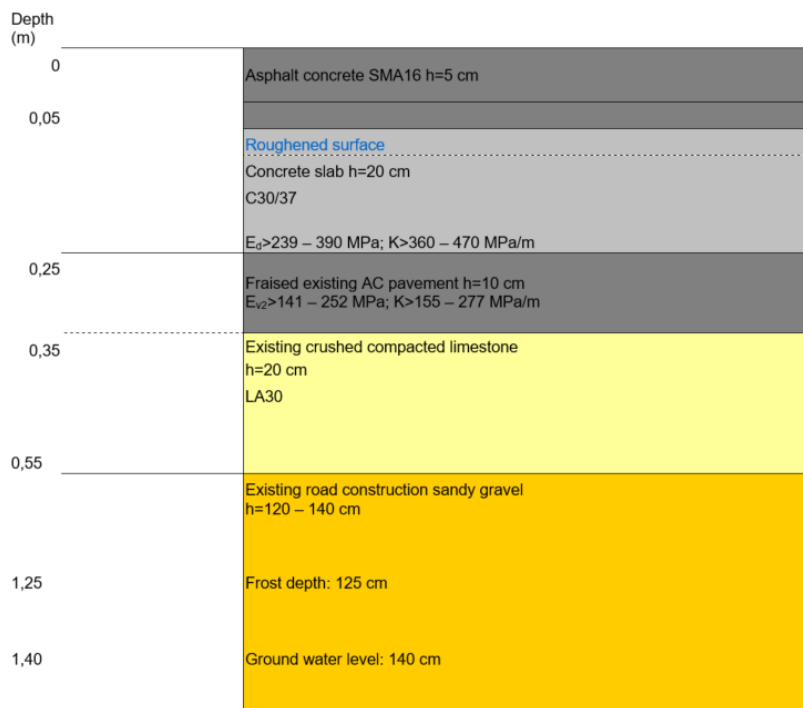
Joonis 6. Betoonkatendi variant 1



Joonis 7. Betoonkatendi variant 2



Joonis 8. Betoonkatendi variant 3.



Joonis 9. Betoonkatendi variant 4.

2.4. Tsementbetoonkatendi dimensioneerimise täpsustamine

Tsementbetoonkatendi dimensioneerimise täpsustamine Westergaardi meetodil Paldiski mnt katselõigu temperatuurigradientide tulemuste baasil võtab arvesse praktilised kogemused katselõigu rajamisest ja selle seirest.

Temperatuurigradiendid betoonkattes

Temperatuuri gradientide andmestik on oluline faktor tsementbetoonkatendite projekteerimisel. Temperatuurigradient põhjustab betoonplaatide kõverdumise, mis osaliselt kompenseeritakse betoonplaadi omakaalu abil. Kuid positiivsete temperatuurigradientide $dt > 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mm}$ puhul koostoimes liikluskoormusega on vaja teada vastavate gradientide esinemissagedusi.

Paldiski mnt betoonkatendisse paigaldatud temperatuuriandurid on koondatud Percostation (PS) moodulisse. PS-st edastatakse andmed ftp serverisse: [ftp.tallinn.ee](ftp://ftp.tallinn.ee). Kasutaja: percostation, parool: p35k057aalt.

Percostation jaama andmete töötlusprogrammi rakendus on esitatud TTÜ uurimustöös: Tallinna teede ja tänavate katendite deformatsioonide ja katete kulumise määramine, lähtudes liiklussagedusest ja teekatendi konstruktsioonist. Tallinna Kommunaalamet 2017.

Rakendus vajab tööks http protokolliga toetatavat veebiserverit, kuhu on installeeritud PHP 7.0 (või uuem) ning MYSQL andmebaas alates versioonist 5.

Rakendus võimaldab esitada graafikud:

- a) Välistemperatuurigraafik CH4
- b) Temperatuurigraafik CH3 betoonplaadi sees sügavusel $h=12 \text{ cm}$
- c) Temperatuurigraafik CH0 betoonplaadi all $h=25 \text{ cm}$
- d) Temperatuurigraafik CH1 killustiku kihis $h=42 \text{ cm}$
- e) Temperatuurigraafik CH2 liivakihis $h=100 \text{ cm}$
- f) Temperatuurigradiendi graafikud
 - o $\text{delta-t-int} = (\text{CH4}-\text{CH0})/130$
 - o $\text{delta-t} = (\text{CH4}-\text{CH0})/250$
 - o $\text{delta-t-ext} = (\text{CH4}-\text{CH3})/120$



Fotod 1 ja 2. Temperatuuriandurid Paldiski mnt katendis

Analüüsis vaadeldakse ainult positiivseid ja lineaarseid temperatuurigradiente.

Sellele vastab kõige konservatiivsem gradient Δt -int.

1.juulist 2016 kuni 1.juulini 2018 saadi temperatuurigradientide esinemissagedusteks:

- $\Delta t > 0,02$ 17,1%
- $\Delta t > 0,04$ 4,1%
- $\Delta t > 0,06$ 0,5 %
- $\Delta t > 0,08$ 0,2% .

Ettepanek betoonkatendite projekteerimiseks Tallinna piirkonnas

Temperatuurigradientide analüüsi alusel tuleb projekteerimisel rakendada Tallinna regioonis järgmisi väärtusi:

1. $\Delta t > 0,04$ °C/mm 20 %
2. $\Delta t > 0,06$ °C/mm 5 %

2.5. Tsementbetoonkatendites kasutatava betooni seguretseptide täiendamine.

Seguretseptide täiendamine ja nõuete täpsustamine. Alkali-silica reaktsiooni tekkimise vältimine. Põlevkivi-tsement CEM II/B-T-42,5N kasutamise tingimused

2.5.1. Alkali-silica reaktsioon

Reaktsiooni portlandtsemendis leiduvate leeliste ja mõningate silikaatsete kivimite või mineraalide vahel nimetakse leelis-räni reaktsiooniks (ingl. alkali-silica reaction, lühend ASR). Reaktsiooni tulem võib põhjustada kivistunud betooni paisumist ning pragunemist.



Foto 3. Alkali-silica reaktsiooni tagajärg¹³

¹³ <https://www.vdz-online.de/en/services/research-and-technology/concrete-and-constituents/asr-alkali-silica-reaction/alkali-kieselsaeure-reaktion/>

Reaktsiooni toimumise eelduseks on kolme faktori üheaegne esinemine:

- piisavalt niiske keskkond
- reaktsioonivõimelise räni vormi esinemine täitematerjali kivimis
- piisavalt kõrge, peamiselt tsemendist tulenev leelishüdroksiidi kontsentratsioon betoonis

Kui üht nendest kolmest loetletud faktorit ei esine, siis reaktsiooni ei toimu.

Leelis-räni reaktsiooni toimumise põhimõtteline kirjeldus.

Reaktsioonivõimeline räni reageerib leelistega, selle tulemusena tekib leelis-räni geel.

Leelis-räni geeli kokkupuutel veega tekib betooni sisene mahumuutus ehk paisumine. Betooni sisene paisumine tekitab betooni pragunemise.

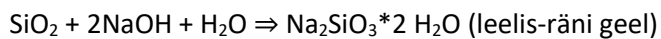


Foto 4. Alkali-silica reaktsioon betoonis¹⁴

Leelis-räni reaktsiooni vältimise võimalikud meetodid:

- hoiduda reaktsioonivõimelise täitematerjali kasutamisest
- piirata betooni leeliste hulka tsemendi tüübi valikuga
- tsemendi hulga vähendamine betooni koostises II tüüpi peenlisandi kasutamise teel .

Täitematerjali reaktsioonivõimelisust hinnatakse nii täitematerjali kivimi petrograafilise analüüsiga, kui ka katseliselt, betooni või mördi prismade mahumuutuse katsetamise teel. Usaldusväärsemad neist on betooni prismade katsetamisel saadud andmed.

¹⁴ <https://www.vdz-online.de/en/services/research-and-technology/concrete-and-constituents/asr-alkali-silica-reaction/alkali-kieselsaeure-reaktion/>

Tsemendi tüübi valikuga on võimalik piirata leeliste hulka betooni koostises. Tsemendi leeliste Na_2O ja K_2O summaarset sisaldust iseloomustab $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}}$ väärtus. Tinglikult võib tsemendid jaotada järgmiselt:

- madala leelise sisaldusega tsemendid on kus $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}} < 0,6$. Selliseid tsemente Eestis ei toodeta.
- keskmise leelise sisaldusega tsemendid, kus $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}} 0,6 \dots 1,25$. Kunda CEM I tsemendid kuuluvad sellesse rühma.
- kõrge leelise sisaldusega tsemendid kus $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}} > 1,25$. Siia kuulub CEM II/B-T-42,5N.

Mida madalam on leeliste sisaldus seda väiksem on leelis-räni reaktsiooni oht. Kõrge leeliselisusega tsemente saab kasutada ainult siis kui on katseliselt kindlaks tehtud et täitematerjal ei ole reaktsioonivõimeline.

II tüüpi peenlisandid mille kasutamise läbi on võimalik vähendada tsemendi hulka betooni koostises on näiteks: peenräni, lendtuhk, kõrgahjuräbu, mis ei sisalda täiendavat kogust leeliseid. Kunda tsementi CEM II/B-T-42,5N saab kasutada betoonis kui lisatakse II tüüpi peenlisandid.

Leelis-räni reaktsiooni (ASR) tulemi määramine laboratoorsete katsetega.

Üle maailma on kasutusel väga suur hulk katsestandardeid ja meetodeid leelis-räni reaktsiooni määramiseks. Valdavalt kasutakse kas ASTM või RILEM poolt koostatud standard-katsemeetodeid milleks on näiteks:

ASTM

- ASTM C295 täitematerjali petrograafiline analüüs
- ASTM C1260 mördi prisma kiirendatud test
- ASTM C1293 betooni prisma pikaajaline test

RILEM

- RILEM AAR-1.1 täitematerjali petrograafiline analüüs
- RILEM AAR-2 mördi prisma kiirendatud test
- RILEM AAR-3 betooni prisma pikaajaline test
- RILEM AAR-4.1 betooni prisma kiirendatud test

Kiirendatud katsemeetodi puhul on katseprismad uputatud neljateistkümneks päevaks 1M (ühe mooline lahus) NaOH lahusesse, mida hoitakse 80°C temperatuuri juures. Pikaajalise testi korral hoitakse betoonist katsekehad soojas ja niiskes keskkonnas – vee kohal temperatuur 38°C juures ühe aasta pikkuse perioodi vältel.

Meetodi ASTM C1260 korral 14 päeva 1M NaOH lahuses hoitud prisma ristlõikega 25x25 mm ja pikkusega vähemalt 250 mm (mille täitematerjali D_{max} on 4 mm) suhteline maksimaalne pikenemine ei tohi olla >0,10%.

ASTM C1293 kohasel katsetamisel betooniprisma ristlõikega 75x75 mm ja minimaalse pikkusega 250 mm suhteline pikenemine ühe aasta pikkusel katseperioodil ei tohi olla >0,040%.

RILEM AAR-3 meetodi katsel betooniprismade 75x75x280 mm suhteline pikenemine ühe aasta möödudes ei tohi olla >0,050%.

Katselaboratooriumi valikut võib piirata selle võimekus konkreetse meetodi alusel katset läbi viia.

Katsetamisel kehtib järgmine põhimõte: Petrograafilise analüüsi teel elimineeritakse potentsiaalselt reaktsiooni võimelised kivimid. Mördiprismade kiirtestiga mis kestab 16 päeva katsetatakse nii jäme kui ka peentäitematerjal. Pikaajalise betooni prismade testiga, mis kestab üks aasta, katsetatakse väljavalitud täitematerjalide ja tsemendi kombinatsiooni.

Tuleb silmas pidada, et täitematerjali mineraloogiline koostis karjääris võib olla muutuv. Sellepärast tuleb tähelepanu pöörata tarnija poolt esitatud andmete ja katsetulemuste ajakohasusele. Üldjuhul andmed ei tohiks olla vanemad kui kolm aastat.

Tsementbetoonkatendites kasutatava betooni segureseptide täiendamine.

Laoturiga (slip-form) paigaldatava betoonisegu koostise valikul tuleb juhinduda järgmisest:

Betoon C35/45

- Minimaalne tsemendi kogus 340 kg/m³
- Vesitsementtegur max 0,45
- Peentäitematerjali D_{max} 4mm ja jämetäitematerjali fraktsioonide kuni D_{max} 32mm vahekord: 30/70%
- Minimaalne manustatud õhu maht sõltub külmakindluse katsetulemustest (soovitav min. 5,0%)
- Laoturiga paigaldatava segu konsistents betoonitehases on klass C2 ning platsil paigaldamise ajal klass C1
- Betoonisegu koostis eeldab superplastifikaatori ja õhku manustava lisandi kasutamist.

Asfaltbetoonist kulumiskihiga betoonkatte valamiseks võib kasutada ka betooni C30/37.

Betoon C30/37 KK2+XF2 (XD2, XC4)

- Minimaalne tsemendi kogus 300 kg/m³
- Vesitsementtegur - max 0,50
- Peentäitematerjali D_{max} 4mm ja jämetäitematerjali fraktsioonide kuni D_{max} 32mm vahekord: 35/65%
- Minimaalne manustatud õhu maht sõltub külmakindluse katsetulemustest (soovitav min. 4,0%)
- Laoturiga paigaldatava segu konsistents betoonitehases on klass C2 ning platsil paigaldamise ajal klass C1
- Betoonisegu koostis eeldab superplastifikaatori ja õhku manustava lisandi kasutamist.

Kunda alustab lähitulevikus CEM II/ B-T 42,5 N tootmist, mis on kõrge leelise sisaldusega, kus $Na_2O_{ekv} > 1,25$.

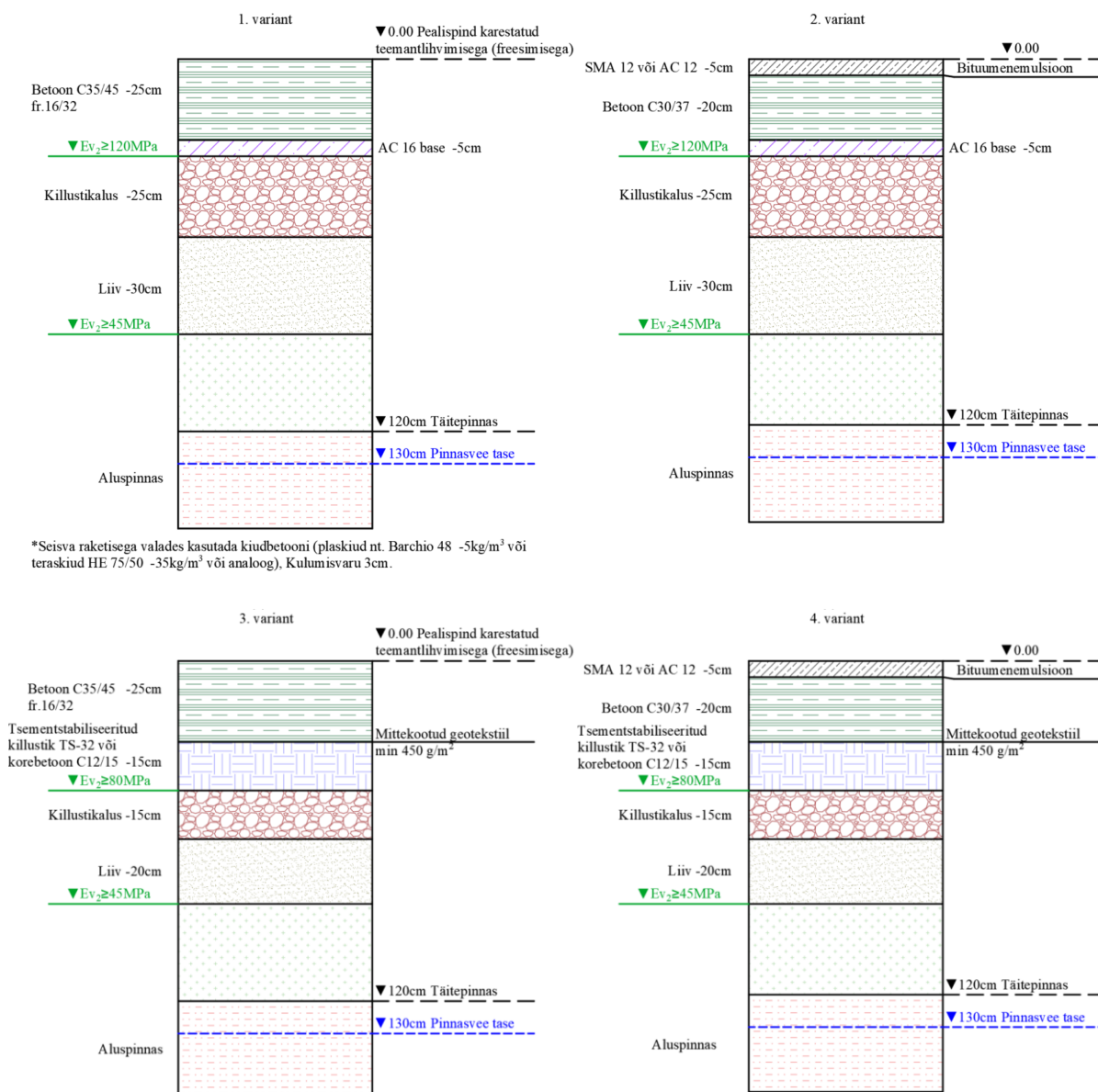
Selle tsemendi kasutamine on perspektiivikas, kui kasutada seda koos vähese reaktsioonivõimega täitematerjali kivimiga. Sellise jämetäitematerjali puhul peavad olema aga täidetud kombineeritult ka teised nõuded nagu An₇, LA₁₅, F1, F115 jne. Samuti ASR eelkatsed tsemendi ja kivimi kombinatsiooni sobivuse kohta ASR < 0,10 % ASTM C1260 14d.

Täiendused ja parandused. Tsementbetoonkatendid.

Tsementbetoonkatendite osas on juhendisse viidud järgmised parandused ja muudatused:

1. Betoonkatendite aluskonstruktsiooni turbeteguri K määramine. Aluskonstruktsiooni uuendatud lahendused. Korebetooni C12/15 kasutamine.
2. Temperatuurigradientide esinemise tõenäosus Tallinna piirkonnas.
3. Betooniseguresepti täpsustamine.
 - Leelis-räni reaktiivsuse ASR määramise nõue.
 - Jämateralise täitematerjali omaduste täpsustamine.
 - Kulumiskindluse tõstmine.
4. Vuugitihendite omadused

Betoonkatendi konstruktiivsed lahendid



Joonis 10. Tsementbetoonkatendi näidis-tüüpkonstruktsioonid koormusklassile A1

2.5.2. Tsementbetoon. Tsement ja täitematerjalid.

Tsementbetoonkate rajatakse libiseva raketise (slip-form laotur) ja/või seisva raketise (screeding laotur) tehnoloogiaga.

Tsementbetoonkatte tüübid:

Tüüblitega kahanemisvuukidega monoliitne tsementbetoonplaat PJCP

- Koormusklass A1 variandid 1 ja 3 - joonis nr.4.5.
- Batoon C35/45 XD3; XF4+KK4, XC4.
- Tsementsideaine: EVS-EN 197-1 tsement.
- Minimaalne tsemendi kogus 340 kg/m³
- Vesitsementtegur max 0,45
- Peentäitematerjali D_{max} 4mm ja jämetäitematerjali fraktsioonide kuni D_{max} 32mm vahekord: 30/70%
- Minimaalne manustatud õhu maht min. 5,0%
- Slip-form laoturiga paigaldatava segu konsistents betoonitehases on klass C2 ning platsil paigaldamise ajal klass C1. Screeding laoturiga paigaldamisel on segu konsistents S3.
- Batoonisegu koostis eeldab superplastifikaatori ja õhku manustava lisandi kasutamist.
- Täitematerjal: Gc 85/20; C100/0; LA₁₅; An7; F1; FI15; f2; F_{NaCl4} (vastavalt EN1260:2002 +A1:2008).

Lisanõuded:

- ASR eelkatse tsemendi ja jämetäitematerjali kombinatsiooni sobivuse kohta ASR < 0,10 % ASTM C1260 14d.
- Tellijaga kooskõlastatult võib tsementbetooni lisada kiudmaterjali.
- Värske valatud betoonkatte pind katta (*curing*) parafiinpõhise materjaliga (vastavalt TL NBM-Stb 09 nõuetele)
- Põik ja pikivuukide servade parandamiseks kasutada erisegusid minimaalse survetugevusega 96 N/mm² (2 -komponendiline epovaik segu BETOPOX 012 MEB või analoog)
- Batoonpinna makrotekstuur:
 - a) pesubetonpind;
 - b) teemantlihvitud-freesitud pind.

PJCP-kaetud asfaltbetoonist kulumiskihiga. SMA 16 kulumiskihi paksus 5 cm.

- Koormusklass A1 variandid 2 ja 4- joonis nr 4.5.
- Batoon C30/37 XD1; XF2 + KK2, XC4.
- Tsementsideaine: EVS-EN 197-1 tsement.
- Minimaalne tsemendi kogus 300 kg/m³
- Vesitsementtegur - max 0,50
- Peentäitematerjali D_{max} 4mm ja jämetäitematerjali fraktsioonide kuni D_{max} 32mm vahekord: 35/65%
- Minimaalne manustatud õhu maht sõltub külmakindluse katsetulemustest (soovitav min. 4,0%)
- Slip-form laoturiga paigaldatava segu konsistents betoonitehases on klass C2 ning platsil paigaldamise ajal klass C1 ja screeding tehnoloogia puhul S3.
- Batoonisegu koostis eeldab superplastifikaatori ja õhku manustava lisandi kasutamist.
- Täitematerjal: Gc 85/20; C100/0; FI20; LA₃₀; f4 ; F2.

- ASR eelkatse tsemendi ja jämetäitematerjali kombinatsiooni sobivuse kohta ASR < 0,10 % ASTM C1260 14d.
- Tellijaga kooskõlastatult võib tsementbetooni lisada kiudmaterjali.
- Nõuded asfaltbetoonile:
 - Sõelad: 20 mm – 100%, 16 mm – 90-100%, 8 mm – 20-45%, 2 mm – 15-26%, 0,5 – 10-20%, 0,063 – 6...12%
 - Minimaalne sideainesisaldus – 6,2%
 - Täitematerjal C100/0; LA₂₀; AN7; F_{NaCl4}
 - PRD_{AIR} 7; A_{brA}32

Lisanõuded:

Projekteerimine.:

- Betoonkatendi aluskonstruktsiooni normatiivne turbetegur $K > 160 \text{ MN/m}^3$, arvutuslik $K > 105 \text{ MN/m}^3$.
- Temperatuurigradientide esinemise tõenäosuseks
 - $dt > 0,04 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$ tuleb võtta 20 % ja
 - $dt > 0,06 \text{ } ^\circ\text{C/mm}$ tuleb võtta 5 %.
- Betoonkatte võib projekteerida ja ehitada vanale asfaltkatele (nn whitetopping). Eelnevalt teostada vastavad geoloogilised uuringud, määrata külmakerkeoht, kandevõime (turbetegur K) mõõtmised ja määramised.

2.6. Vuugid betoonkattes

Tüübel-ja ankurvardad.

Põikvuugis asetsevad siledad terasest S 235 JR tüübelvardad läbimõõduga $d=25 \text{ mm}$ ja pikkusega 500 mm asetatakse betoonkattes üldjuhul vahekaugusega 250 mm. Tüüblid on kogu ulatuses kaetud PE plastikkattega, minimaalse paksusega 0,3 mm.

Pikivuugis kasutakse ankurvardaid kuumvaltsitud terasest BSt S500 (DIN ENV 10080, lisaks vastavad ankurvardad ka standardile EN 13877-1: 2004). Ankurvardad läbimõõduga $d=20 \text{ mm}$, pikkusega 700-800 mm paigaldatakse betoonkattes vahekaugusega 900-1500 mm. Varras on keskelt 1/3 pikkuses kaetud betooniga mittenakkuva PE plastikvärviga (paksus min 0,3 mm).

Tüübel- ja ankurvardad asetsevad betoonplaadi paksuses keskjoonel.

Vuugitihendid:

- a) kokkusurutavad EPDM neopreentihendid (vastavalt ZTV Fug-StB 01nõuetele);
- b) silikoonmastiks (Dow Corning 888 või analoog). Materjali pikenemine minimaalselt 1200 %, elastsusmoodul 150 % pikenemise juures 310 kPa.
- c) vuugitihendite alla paigutatakse täisristlõikega polüetüleenvahust vuugitäitenöör, mis vastab ASTM D 5249 nõuetele.
- d) Pikivuukides võib kasutada valatavaid bituumenvuugisegusid (ASTM D3405 nõuetele vastav segu)

3. Tüüpkaevukonstruksioonid

3.1. Eessõna ja Kokkuvõte

Tallinnas ajalooliselt väljakujunenud praktika kohaselt paiknevad tehnovõrgud suures osas transpordimaal, sõidutee katendi all. See on paljuski tinginud olukorra, kus sõiduteel asetsevad ka nende tehnovõrkude mitmesugused vaatlus-, kontroll- ja hoolduskaevud. Uutel rajatavatel A1, B2, C3 koormusklassi tänavatel-teedel tuleb sellisest praktikast hoiduda ja paigaldada tehnovõrgud sõiduteest väljapoole või tehnotunnelitesse.

Probleemi sisuks on liiklussageduse ja koormussageduse kasv Tallinnas, mis on toonud välja probleemid sõiduteel asetsevate tehnovõrkude kaevukonstruksioonidega. Kaevu- ja kaevupäiste konstruksioonidega eksploatatsioonis ilmnevad defektid (sh projekteerimis- ja ehitusvead) mõjutavad otseselt teede ja tänavate katendite eksploatatsioonilisi omadusi ning teekatendi eluiga.

2014.aastal alustati Tallinnas ettevalmistusi üleminekuks kaevukonstruksioonide tüüplahendustele ning rajati tänavate- teede rekonstrueerimise käigus uuendatud kaevupäisekonstruksiooniga kaevud. 2016.a aprillis kehtestati Tallinnas kaevupäiste tüüpkonstruksioonide juhend.

Juhendi kasutusele võtmise järel on toimunud kaevukonstruksioonide väljaehitamisel ja remontimisel järgmised muutused:

1. Tellijad, tehnovõrkude omanikud-valdajad, omanikujärelevalve, projekteerijad, ehitajad ja kaevutoodete tarnijad on teadvustanud uute lahenduste kasutusele võtmise vajadust.
2. A1, B2, C3 koormusklassiga teedel-tänavatel kasutatakse kaevude rajamisel ja remontimisel betoonist koormusjaotusplaati.
3. Lähtudes juhendi nõuetest minnakse järk-järgult üle kvaliteetsest malmist massiivsematele luugikomplekti ja luugi konstruksioonidele.
4. Kaevupäiste ümbruse asfalteerimisel kasutatakse 2 varianti:
 - a. Kaevupäiste tõstmine samaaegselt asfalteerimisega ja päiseümbruse nõuetekohase tihendamisega
 - b. Kaevupäise väljafreesimine (piikamine) peale tänava-tee asfalteerimist, luugikomplekti tõstmine sõidutee tasemele tõsteseadeldisega DBT T60 ning päise ümbruse täitmine täiteseguga Vergumix (või analoog)
5. Jäikade kaevude luugikomplekti paigaldamiseks sõidutee pinda kasutatakse nn lühikese teleskooposaga kaevupäise konstruksiooni. Kaevupäis muutub nn. ujuvaks.
6. Jäikade kaevude paigaldamisel ning luugikomplekti tõstmisel sõidutee pinda kasutatakse tehnoloogiat, mis on kirjeldatud TTÜ uurimistöös¹⁵

¹⁵ „Tallinna tänavatel ja teedel asuvate tehnovõrkude kontroll-, ühenduste- ja vaatluskaevude ning kapede konstruksioonide täiustamine, tüüplahenduste ja paigaldustehnoloogiate juhendmaterjali väljatöötamine” Tallinn 2014.



Foto 5. Kaevupäiste tõsteseadeldis DBT T60

Käesoleva uurimistöö sisuks on tüüpkaevukonstruktsioonide juhendi rakendamise analüüs ning üleskerkinud täiendavate probleemide lahendus ettepanekud. Uurimistöö sisaldab järgmisi teemasid:

1. Tehnovõrkude kaevukonstruktsioonis kasutatava koormusjaotusplaadi mõju teekonstruktsiooni deformatsiivsusele. Katseobjektid: Ehitajate tee, Punane tn, Smuuli tee- Suur-Sõjamäe ristmik, Hiiu tn, Tammsaare tee.
2. Kaevupäise luugikomplekti uuendatud konstruktsioon. Täpsustatud nõuded malmile ja kaevupäise malmosade vahelistele tolerantsidele. Vergumix (või analoogse) tehnoloogia kasutamine ehitamisel ja remondil (sh. garantiiremondil).

Analüüsi aluseks on uurimistöö „Tallinna teede ja tänavate katendite deformatsioonide ja katete kulumise määramine, lähtudes liiklussagedusest ja teekatendi konstruktsioonist, 2. etapp“. TTÜ Ehituse ja Arhitektuuri Instituut. Tallinn 2018.

Analüüsi ja uurimistöö käigus on konsulteeritud ehitus- ja järelevalve organisatsioonidega. Samuti on lahenduste väljatöötamisel tehtud koostööd tehnovõrkude omanike-valdajate ja kaevukonstruktsioonide tarnijate ning valmistajatega.

Uurimistöö ja parandused juhendile täiendavad EVKIS 2013 poolt koostatud uuringut „Kanaliseerimiskaevude valik“, Elektrilevi OÜ poolt koostatud „Nõuded kaablitunnelitele ja –

kanalisatsioonile“, OÜ Gaasivõrgud nõudeid „Võrguarmatuuri kaitsekaped“ ja AS Tallinna Vesi tehnilisi nõudeid “Kaevude ja sulgeseadmete luugikomplektid“ ning toetub TTÜ uuringule.

Käesoleva uurimistöö tulemusena tuuakse välja probleemid, mis on jätkuvalt seotud sõiduraja rattajäljes olevate kaevukonstruktsioonidega (puudutab eelkõige vanu olemasolevaid kaeve):

1. Kaevupäise (ujuvad kaevupäised) ümber olev katendikonstruktsioon on vajunud madalamale kattepinnast rohkem kui 1,8-2 cm.
2. Kaevuluugi paindejäikus on madal, luuk loksus luugikomplektipesas, luugi kontaktpind on kulunud siledaks.
3. Kaevuluuk on vajunud kaevupäise luugikomplekti servast madalamale rohkem kui 5 mm. Veoki ratta ülesõidul tekib dünaamiline löök.
4. Suure liiklussageduse korral tekib luugi ja luugipesa vahelise liigsuure külgtolerantsi tõttu luugi liikumine luugipesas ning paindevõnkumine. Soodsatel tingimustel imetakse kaevuluuk pesast välja (tekib resonants).
5. Jäik kaevupäis jääb sõidutee katte kulumisel (ka katendikonstruktsiooni ühtlasel vajumisel) kõrgemale sõidutee pinnast rohkem kui 5 mm.

Uurimistöö tulemusena esitatakse ettepanekud tüüpkaevukonstruktsioonide juhendi muutmiseks ja parandamiseks:

1. Kaevupäiste ümber oleva katendikonstruktsiooni kandevõime mõõtmine Taani LWD (Dynatest LWD, Prima 100) tüüpi seadmega. Tegemist on lihtsa ja kiire ekspressmeetodiga.
2. Suurendatakse koormusjaotusplaadi mõõtmeid. Koormusjaotusplaati ei ole vaja kasutada tsementstabiliseeritud killustiku või korebetooni korral.
3. Plastist teleskoopitoru tugevuse (seina paksuse) ja ringjäikuse tagamiseks peab toru standardmõõtude suhe olema SDR33. Teleskoopitoru maksimaalne pikkus kuni 100 cm.
4. Luugikomplekti ja luugi malmi mark: GG25, GG20 või GJL-200.
5. Luugi ja luugipesa lubatud summaarne külgtolerants 4 mm.
6. Kaevupäiste ümbruse täitmisel kiirkivinevate segudega ei tohi sõidutee kattel ekspluatatsiooni käigus tekkida radiaalpragusid.
7. Kaevu luugikorpus koos luugiga on kulutoode, mis kuulub väljavahetamisele peale teatud funktsionaalsete omaduste muutumist:
 - a. Kaevuluuk tuleb välja vahetada kui luugi muster on täielikult kulunud.
 - b. Luugikomplekt tuleb välja vahetada kui luugi kontaktpind erineb luugikomplekti serva kontaktpinnast rohkem kui 5 mm. Samasugune vahetus tuleb teostada kui luugikomplekti serv on kõrgemal sõidutee pinnast rohkem kui 5 mm ning viia luugi ja serva pind sõidutee pinnaga tasa.

Kaevukonstruktsioonide rajamisel tuleb lähtuda sellest, et standardi EN 124 nõuded on üldised ja minimaalsed. Tüüpkaevukonstruktsioonide juhendi nõuded on täpsustatud ja kohandatud Tallinna tingimustele.

3.2. Kaevukonstruktsioonide ehitamine katseobjektidel ja nende ekspluatatsioon

3.2.1. Ehitajate tee



Fotod 6 ja 7. Koormusjaotusplaadi paigaldamine - Ehitajate tee (2014) ja paigaldatud plaat tihendatud killustikaluses



Fotod 8-10. Lahti piigatud kaevupäis, luugikorpus on eemaldatud. Gaasipõletiga soojendatakse asfaldipinda enne Vergumix segu paigaldamist. Luugikorpus paigaldatud. Kaevupäise ümbruse täitmine Vergumix-seguga (2014)



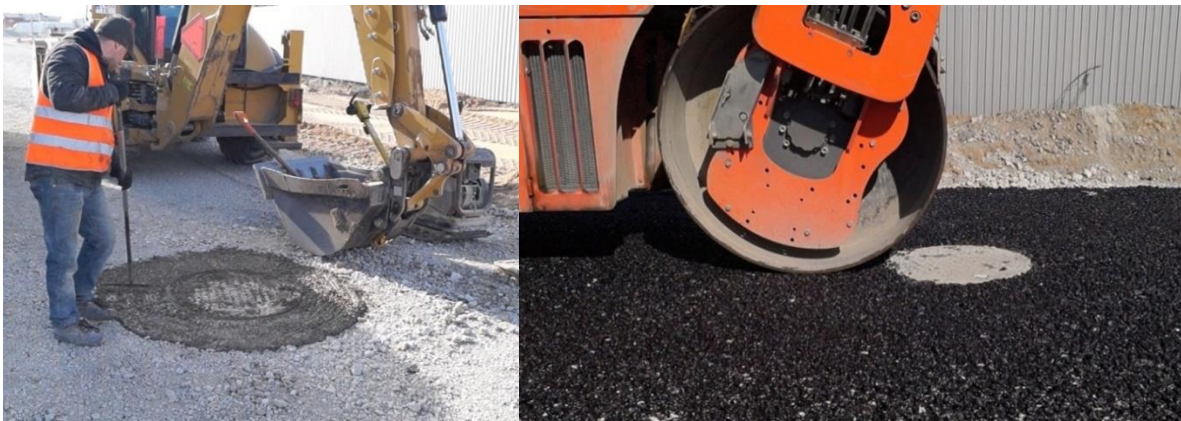
Fotod 11 ja 12. Valmis paigaldis. Ehitajate (2014), (2018)

Ehitajate tee katendis on arenenud pikiroopad 2014-2018 6-7 mm ja ilma koormusjaotusplaadita on kaevupäised vajunud 20 mm. Koormusjaotusplaadi ja Vergumix seguga paigaldatud kaevupäis on vajunud koos kattega.

3.2.2. Suur-Sõjamäe tn



Fotod 13 ja 14. Suur-Sõjamäe tn kaevupäise ümbruse lahtikaevamine (2015) ja kaevupäise koormusjaotusplaadi valamine



Fotod 1 ja 16. Suur-Sõjamäe koormusjaotusplaadi valamine 2 (2015) ja asfalteerimine



Foto 17. Suur-Sõjamäe kaevuümbruse asfalteerimine-2 (2015)



Foto 18-19. Suur-Sõjamäe kaevud (2015) (2018)



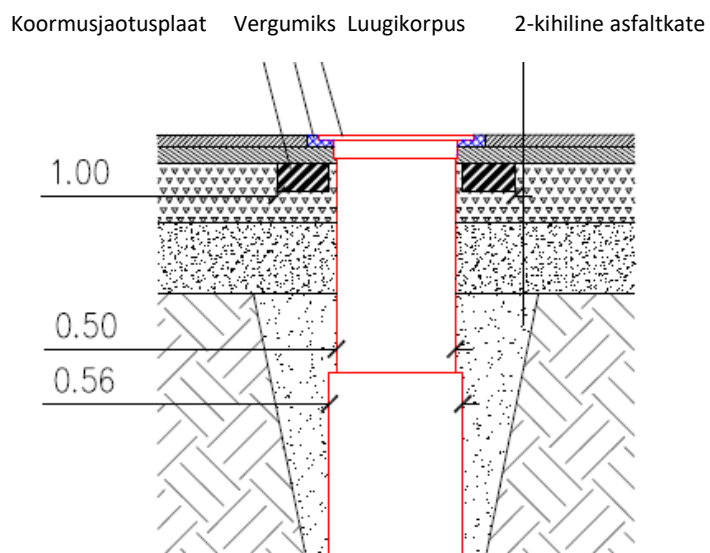
Foto 20. Suur-Sõjamäe 2018.a. Kaevupäise ümbrus täidetud Densifaltiga. Densifalt on pragunenud.

Suur-Sõjamäe tn katendis on aastatel 2015-2018 arenenud roopad 4-6 mm. Vaadeldava kaevupäise vajumiks on fikseeritud 5 mm, kaevupäis on vajunud koos kattega.

3.2.3. Kotka tn



Foto 21. Paigaldatud koormusjaotusplaat Kotka tn 2016.a. Teleskooptoru koos luugikomplektiga on eemaldatud.



Joonis 101. Kaevukonstruktsiooni põhimõtteline skeem-joonis



Foto 22-23. Kaevupäise ümbruse täitmine Vergumix seguga Kotka tn 2016.a. Vergumix-segu on pragunenud (2018)

3.2.4. Hiiu tn



Foto 24. Vergumix täidetud kaevupäise ümbrus Hiiu tn 2018.a. Kaev ehitatud 2015.a.



Foto 25. Vergumix segu pragunemine Hiiu tn 2018.a.

3.2.5. Punane tn

Punasel tn on 2014-2018 arenenud pikiroopad 5-7 mm. Koormusjaotusplaadita kaevupäised on vajunud 35 mm. Restkaevud mis toetuvad koormusjaotusplaadile ei ole sisuliselt vajunud.

3.2.6. Tammsaare tee

Tammsaare tee roopad on arenenud 2015-2018 8-11 mm ja kaevupäised on vajunud Pärnu mnt viadukti all 20-25 mm. Kaevupäiste ümbrus on ilmselt suhteliselt halvasti tihendatud, lisaks on selles piirkonnas kõrge pinnasevee tase.



Foto 26. Tammsaare tee 2018.a kaev Pärnu mnt viadukti all



Foto 27. Tammsaare tee 2018.a kaev Pärnu mnt viadukti all



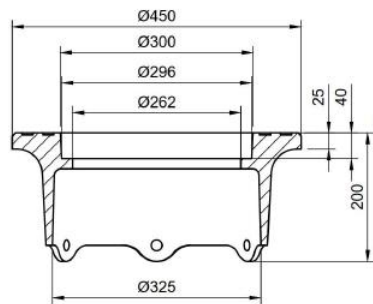
Foto 28. Tammsaare tee 2018.a kaev ratta jäljes

3.3. Tüüpkaevukonstruksioonide luugikorpuste komplektid ja nende kasutamine
2017-2018 a. on kasutusele võetud tugevdatud konstruktsiooniga luugikorpuste komplektid:

- a. 315 seeria
- b. 500 seeria
- c. 630 seeria

315 Heavy Duty Frame:

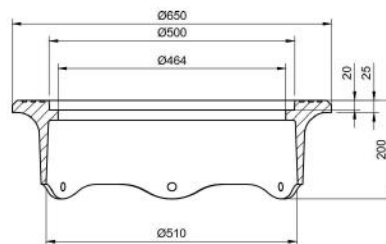
3366143-N, Weight 44 KG



Joonis 12. Tüüpluugikomplekt - 315-seeria

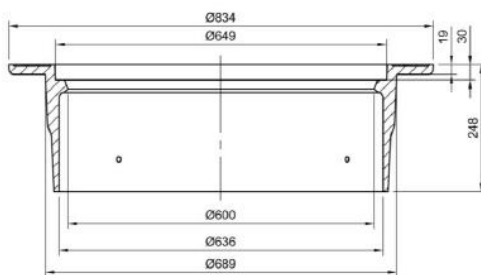
500-series:

Heavy Duty Frame, 3366145-N, Weight 66Kg

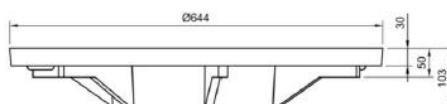


Joonis 13. Tüüpluugikomplekt - 500-seeria

630 HD Frame, 3366165-N Weight 92 KG



630 HD Blind Cover, 3366166-N Weight 72 KG



Joonis 1411. Tüüpluugikomplekt - 630-seeria

Tüüpkaevukonstruktsioonide juhendi järgi on ehitatud-rekonstrueeritud Merivälja tee, Haabersti ristmik. Narva mnt Kreuzwaldi ja Endla tn bussipeatustesse on betoonkattesse valatud restkaevud.



Foto 39. Kaev Merivälja tee 2018 .a.



Foto 30. Restkaevud Merivälja tee 2018.a.



Foto 31. Neelukaev Haabersti ristmik 2018 .a.



Foto 4. Neelukaev ja sadeveekaev - Haabersti ristmik 2018.a.



Foto 5. Narva mnt Kreuzwaldi betoonkattega bussipeatuse ehitus 2017.a.



Foto 6. Valminud Endla betoonkattega bussipeatus 2017.a.. Restkaevu päis on valatud betoonkatte sisse.

Uute kasutatavate luugikorpuste krae laius on 5-6 cm. Teleskoopitorude ringjäikus on suurendatud SN2-ni. Malmist luugikorpust kinnitub plastist teleskoopitoru külge 6 poldiga D16 mm. Kaevuluugi ja selle korpuse materjaliks kasutatakse malmi GG25 (või GG20, GJL-200). Kaevu enda konstruktsioonitelg on vertikaalne aga kaevuluugile tuleb anda nii pikikalle kui ka põikkalle. Selletõttu tuleb kaevuluugi täpseks paigaldamiseks lubada teleskoopitoru vastavat kallutamist. Seda on kõige efektiivsem teha näiteks DBT T 60 tõsteseadeldisega (vt: Foto 5).

"Ujuva" kaevupäisega kaevukonstruktsiooni kontseptsioon põhineb eeldusel, et teekatte kulumine ning võimalikud vajumised (deformatsioonid) kompenseeritakse kaevu teleskoopitoru liikumisega. Samuti on selline lahendus suhteliselt tehnoloogiline asfaltbetoonkihtide paigalduse seisukohast.

Peamised kaevupäiste läbimõõtude klassid on D315, D500 ja D630 mm

Jäigad kaevukonstruktsioonid ja kaevupäised on teede- ja tänavate laoturiga asfalteerimisel küllaltki suureks tehniliseks takistuseks. Asfalteerimisel kihtide kaupa tõstetakse ka kaevuluugi konstruktsiooni järk-järgult tõsterõngaste abil. Selle tehnoloogia detailsem kirjeldus on antud TTÜ uurimistöös. /31/.

A1 koormussagedusega teede ja tänavate sõiduteele tuleb eelistatult rajada jäigad kaevukonstruktsioonid. Jäikade kaevude remontimisel võib kasutada nn lühikese teleskoopitoruga kaevupäist. Sellise kaevupäise puhul kasutatakse lühikese (hk=200-400 mm) plastist teleskooposaga luugikorpust, mis paigaldatakse betoonist kaevuluugi või tõsterõngaste sisse. Luugikorpuse krae aga toetub sõidutee asfaltbetoon pinnale. Sellega kompenseeritakse teepinna vajumised ja deformatsioonid. Sellisel juhul tekib nn ujuv kaevupäis. Teleskooposa ei tohi ulatuda kaevu betoonkaanest sügavamale.

3.4. Tehnovõrkude kaevupäiste defektid.

Sõiduteel aktiivses liiklustsoonis rattajäljes asetsevate tehnovõrkude kaevude ja kaevupäistega seonduvad probleemid tänases situatsioonis:

- 1) Jätakuvalt esineb massiliselt olukordi kus kaevuluugi ümbrus (koos kraega) on ära vajunud, asfaltbetoon purunenud, mistõttu pääseb sadevesi kaevuluugi kõrvalt teekonstruktsiooni. Põhjuseks – katendikonstruktsioon kaevu ümber ei vasta teedehituse tehnoloogilistele nõuetele.



Foto 35. Vajunud kaev



Foto 7. Rattajäljes asetsev kaev.

Luugi muster on praktiliselt ära kulunud. Luugi kontaktpind on madalamal kui luugikomplekti serv (ka selle muster on ära kulunud). Põhjuseks madal malmi pinna kulumiskindlus.



Foto 8. Puudub koormusjaotusplaat.

Kaevupäis parandatud aga vajumine toimub edasi. Siin tuleb valada ühine koormusjaotusplaat. Luuk kulunud ning asetseb madalamal luugikomplekti servast üle 10 mm.



Foto 38. Vajumine pikisuunas 52 mm (erakogu)

Kaevupäise osas on palju tehnoloogilisi küsimusi. Kaevu enda konstruktsioonitelg on vertikaalne aga kaevuluugile tuleb anda nii pikikalle (1-2%) kui ka põikkalle (2-2,5%). Selletõttu tuleb kaevuluugi täpselt paigaldamiseks lubada teleskoopitoru vastavat kallutamist. See on võimalik tõusutoru tihendi järeleandlikkuse abil.

2) Kaevu remontimisel tekib kaevuluugi ümbruse asfalteerimisel vuuk vana asfaltkattega. Vuugi ebatiheduse ja kaevu ümbruse tagasitäite tihendamise ebapiisavuse tõttu kui ei ole paigaldatud koormusjaotusplaati oleme saanud uue vajumise. Puudub koormusjaotusplaat



Foto 39. Lagunenud kaevu ümbrus (erakogu)

3) Kaevu luuk on vajunud (asetunud) madalamale luugikomplekti kraest. Võimalik põhjus – luugi alumise serva kulumine luugipesas. Luugi pealmise kontaktpinna kulumine.



Foto 40. Kaevu luuk on kraest madalamale vajunud



Foto 41. Luuk on madalam 12 mm

4) Kaevuluugi kolksumine. Kaevuluugi "välja imemine" luugi pesast. Luugi ja luugipesa ühenduspind on ebatasane, luuk on pesas ebatihedalt (suured tolerantsid)

5) Tee on kaevupäise ümber ära vajunud-kulunud. Luugikomplekti konstruktsioon ulatub teepinnast välja.



Foto 42. Jääk kaevupäis tänava kattes



Foto 43. Kaevupäis on tänava kattest kõrgemal 15mm

3.5. Kaped A1, B2, C3 koormusklassi tänavatel-teedel

Omanikujärelevalve poolt on välja toodud ka probleemid kapedega. Kapede alla tuleks samuti paigaldada (valada) betoonist koormusjaotusplaat. Lähestikku asetsevate kapede alla tuleb valada ühine koormusjaotusplaat. Kapede malmmaterjal peab olema sama mis harilikul luugikomplektil.



Foto 44. Kapede ümbrus on halvasti tihendatud. Puudub koormusjaotusplaat.

Siin tuleb valada üks kõiki kapesid ühendav koormusjaotusplaat. Kapede pealispind kulunud.

3.6. Sademevee restkaevuluugid

Tallinnas on kasutusel erinevat tüüpi sadevee restkaevuluugid: nelinurksed, ümarad ja äärekivisse paigaldatavad neeluluugid (2 varianti).

Sõiduteele paigaldatakse nelinurksed ja ümarad restluugid, kus kasutatakse ujuvat tüüpi kaevupäist betoonist koormusjaotusplaadiga. Äärekivisse paigaldatav neeluluuk ja osaliselt rentsliis paiknev neeluluuk paigaldatakse kas jäigale betoonist kaevule või plastkaevu teleskoopitoru peale ja fikseeritakse betoonpadjaga. Sõidutee pinnas olevate restluukide tugevusklass peab olema D 400. Neeluluukide puhul võib tellijaga kooskõlastatult kasutada ka luugikorpusi tugevusklassiga C 250. Arvestades talihooldusele esitatavaid nõudeid on kõige tehnoloogilisem lahendus osaliselt rentsliis asetsev neeluluuk

Erinevate restkaevutüüpide paigaldamise tehnoloogilised lahendused on kirjeldatud EVKIS „Kanaliseerimiskaevude valik“ Rakendusuuring. 2013 ja TTÜ uurimistöös „Tallinna tänavatel ja teedel asuvate tehnovõrkude kontroll-, ühenduste- ja vaatluskaevude ning kapede konstruktsioonide täiustamine, tüüplahenduste ja paigaldustehnoloogiate juhendmaterjali väljatöötamine“. TTÜ Teedeinstituut. Tallinna Kommunaalamet 2014.



Foto 95. Nelinurkse restkaevuluugiga sadeveekaev Pärnu mnt



Foto 46. Ümmarguse restkaevuluugiga kaevud Merivälja teel



Foto 47. Osaliselt rentsliis paiknev neeluluuk paigaldatakse kas jäigale betoonist kaevule või plastkaevu teleskooposale. Suur-Sõjamäe tn



Foto 4810. Osaliselt rentsliis paiknev neeluluuk. Tugevusklass C 250. Neeluluuk fikseeritakse betoonpadjaga



Foto 49. Neeluluukkaev Haabersti ristmikul

3.7. Luugikomplekti kontaktpinnad

Sõltuvalt tänava-tee liiklussagedusest, kaevupäiste asetusest ning kaevuluugi malmi omadustest toimub luugi ning luugipesa serva kulumine. Luugi ja serva kulumise tõttu tekib võrreldes ümbritseva teekattega lokaalne ebatasasus, mis võib ulatuda 15-20 mm. Samuti väheneb luugi pinna kulumise tõttu antud pinna haardetegur.

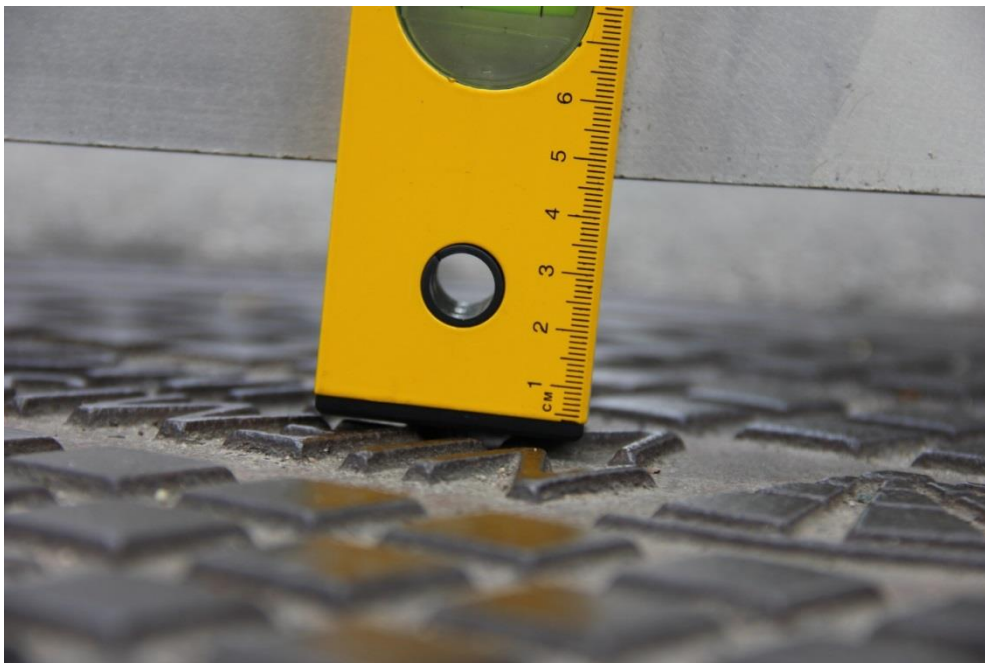


Foto 50. Kaevuluugi pinna kulumismuster ja kontaktpind



Foto 51. Kaevuluugi pinna muster



Foto 11. Kontaktpinna selgitus. Kaevuluugi pinna kulumismustri kõrgus ca 6mm.

Sõiduki ratta ja kaevuluugi (ka luugikomplekti serva) mustri ülemise pinna vahel tekib nn kontaktpind. Kaevuluuk võib olla vajunud luugikomplekti serva kontaktpinna suhtes madalamale kahel põhjusel:

- a) Luugi toetuspinna ja luugipesa vahelise hõõrdumise tõttu asetub kaan sügavamale võrreldes luugikomplekti serva kõrgusega
- b) Luugi (luugikomplekti) pealmine muster kulub sõiduraja rattajäljes (liiklusageduse tõttu)

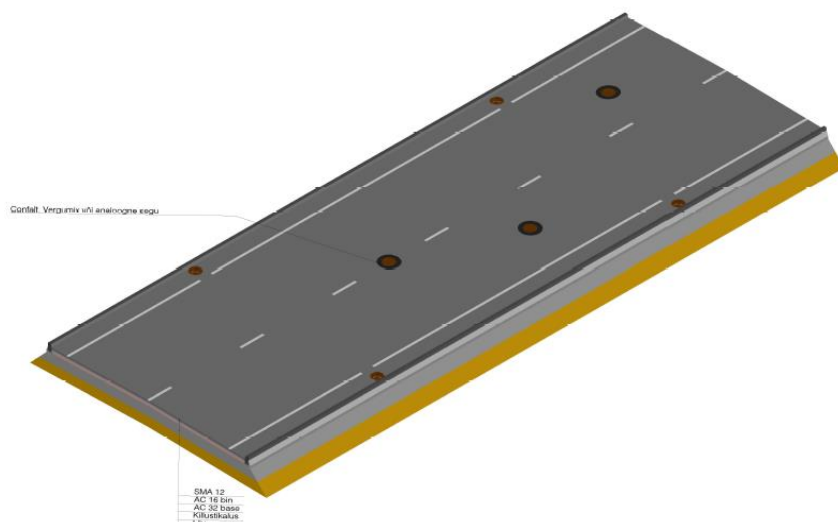
Kaevupäise malmist luugikorpuse on kulutoode, mis on vajalik välja vahetada peale teatud funktsionaalsuse kaotamist.

Kaevuluuk tuleks välja vahetada kui luugi muster täielikult kulunud.

Luugikorpuse koos luugiga tuleks välja vahetada kui luugi kontaktpind on madalamal luugikomplekti serva kontaktpinnast rohkem kui 5 mm. Luugikomplekti serva kontaktpind võib olla kõrgemal ümbritseva sõidutee katte pinnast maksimaalselt 5 mm (mõõdetuna 3 m latiga piki sõiduraja rattajälge). Kui see nõue ei ole täidetud tuleb luugikomplekt välja vahetada ja paigutada tänava katte pinna kõrgusele.

Kaevuluugi ja luugikomplekti serva mustri kõrgus on harilikult 6mm

3.8. Kaevupäised sõiduteel. Põhinõuded



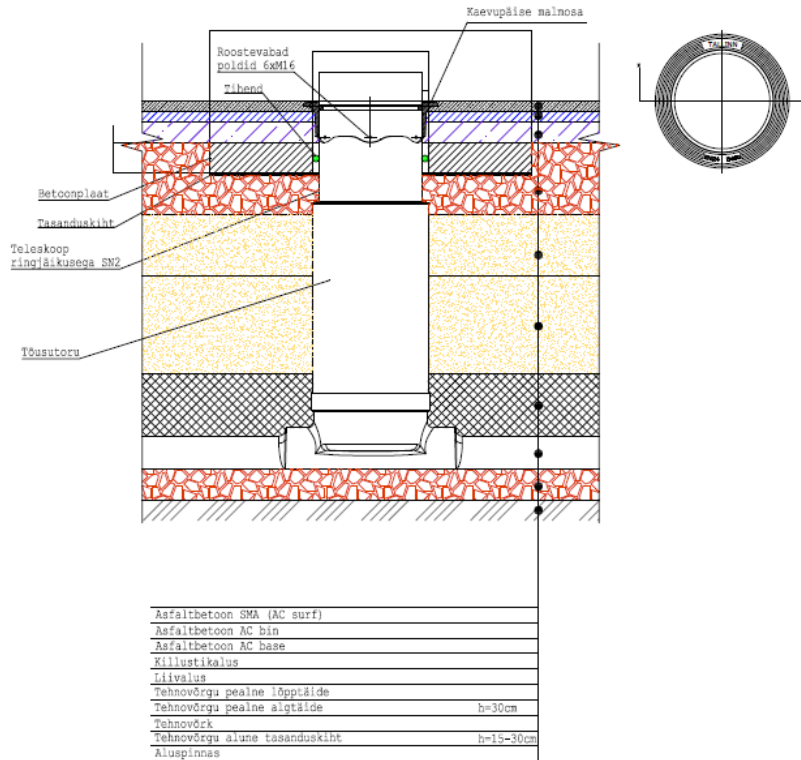
Joonis 15. Tehnovõrkude kaevupäiste asetus sõiduteel. (K-Projekt AS e-mail 23.10.2014)

Jätakuvalt peab kehtima nõue ,et tehnovõrgud koos kaevukonstruktsioonide ja kaevupäistega tuleb paigutada kõnniteede-kergliiklusteede ja eraldusribade, mitte sõidutee (sõiduradade) alla (va restkaevud). Kasutada pimeühendusi.

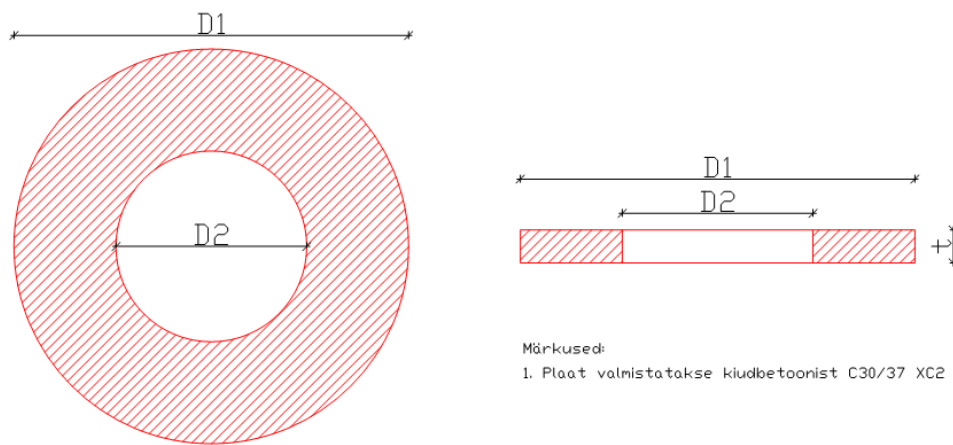
- Erandkorras sõidutee (sõiduradade) ossa lubatud vaatlus-, kontroll- ja ühenduskaevude ja kapede hulk peab olema võimalikult minimaalne.
- Kaevuluugid ei tohi paikneda sõidukite sõidujälgedes.
- Üleminekul InfraBIM tehnoloogiale esitada projektides piisava detailsusega 3D mudelina tehnovõrkude kaevukonstruktsioonid ja tehnovõrkude asetus teekonstruktsiooni all, samuti kaevude paiknemine sõiduteel koos sõiduradade markeeringuga (esitada 3D visualiseeringuna).
- Katendikonstruktsioonis paiknevate kapede, kaevukonstruktsioonide ja kaevupäiste ümber asetsev teekatend peab vastama antud sõidutee teekatendi konstruktsioonilistele ja tehnoloogilistele nõuetele (tihendamise ja kandevõime nõuded, ühenduspindadele ja erinevate materjalide vaheliste kokkupuutepindadele- vuukidele esitatavad nõuded jne).

3.9. Koormusjaotusplaat ja luugikorpus

Teekatendi konstruktsiooni killustikalusesse rajatakse ümber teleskoopitoru betoonist koormusjaotusplaat.



Joonis 16. Kaevukonstruksiooni tüüristprofiil teekatendis. (Reaalprojekt OÜ e-mail 24.09.2015)



Joonis 17. Koormusjaotusplaadi iseloomustavad mõõdud

Koormusjaotusplaadi konstruktsioon ja paigaldamine

Koormusjaotusplaadi alla paigaldatakse tihendatud killustikukihile tasanduskiht. Tasanduskihi võib rajada paesõelmetest, peenikesest killustikust (näiteks paekivikillustik fr 0/8, 2/8) või tsemendi baasil valmistatud kuivsegust.

Koormusjaotusplaadi võib valmistada kohapeal või kasutada eelvalmistatud betoonplaati.

Plaadi paksus $t > 100\text{mm}$ eelvalmistatuna ja $t > 120\text{mm}$ kohapeal valmistatuna. Plaadi välisläbimõõt $D1 = D2 + 1000\text{ mm}$.

Koormusjaotusplaadi keskel on avaus diameetriga $D_2 = D_{te} + 80 \text{ mm}$, D_{te} – plastik teleskooptoru välisläbimõõt millimeetrites. Ümber teleskooptoru jäetakse vahemik ca 60 mm, millesse asetatakse torujas ekstraheeritud polüetüleenist tihend (takistamaks asfaltbetooni sattumist teleskooptoru ümber), mis vastab standarditele DIN 18540 ja ASTM D5249 tüüp 3 ja ASTM C1330 tüüp C (või analoog). See vahemik on vajalik ka luugikomplektile teekatte kalde järgimiseks.

Lähestikku asetsevate kaevukaante grupi alla tuleb valada ühine koormusjaotusplaat. Plaadi serva kaugus teleskooptorust 0,5 m. Koormusjaotusplaati pole vaja kasutada tsementstabiliseeritud või korebetoonist C12/15 aluskihi korral.



Foto 12. Torujas tihend (näidis)

Betooni mark – kiudbetoon C30/37 XC2 XF3 KK3. Teraskiud Hendix prime 75/52 40 kg/m³ (või analoog). Normtõmbetugevus $f_{stk} > 3,0 \text{ MPa}$.

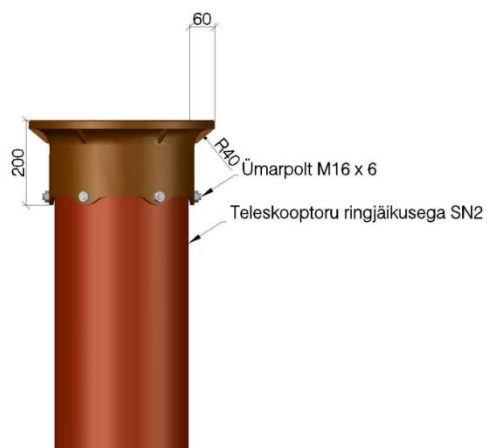
Asfalteerimise käigus töödeldakse betoonist plaadi pealispinda bituumenemulsiooniga, et tagada paremat naket asfaltbetooniga.

Luugikorpus ja ühendus plastist teleskooptoruga

Luugikorpus ühendatakse plastist teleskooptoruga 6 roostevaba terasest poldiga (joonis nr 18) Luugikomplekti põhimõõtmel on toodud joonistel nr 19-21.

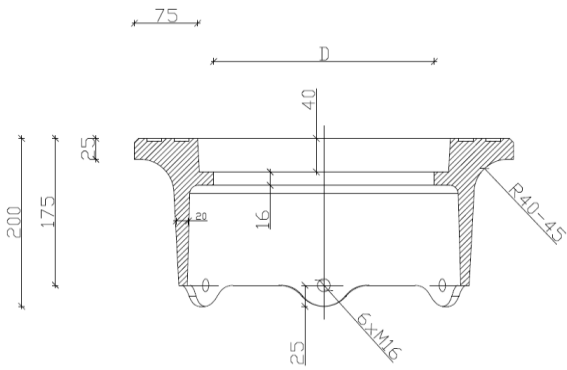
Tagamaks plastist teleskooptoru tugevust ja ringjäikust peab standardmõõtude suhe olema SDR33. Teleskooptoru minimaalne pikkus, mis jääb tõusutoru sisse kaevu lõplikul paigaldamisel – 20 cm.

Teleskooptoru maksimaalne pikkus 80-100 cm.

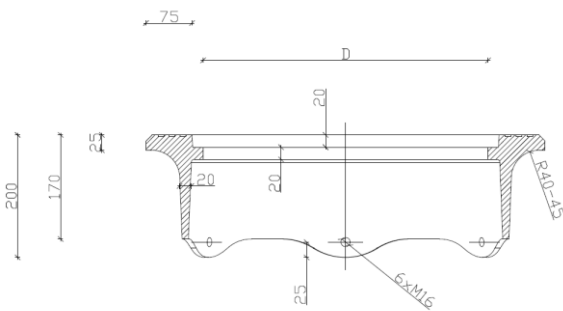


Mõõtmed antud millimeetrites

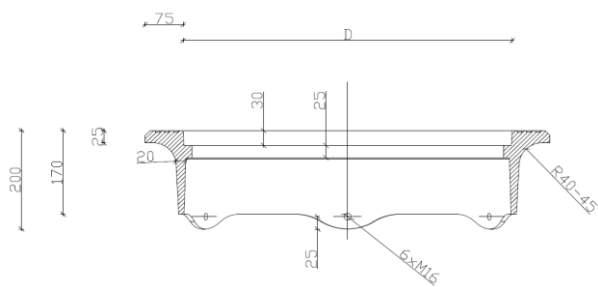
Joonis 12. Luugikomplekti ühendus plastist teleskooptoruga. (K-Projekt e-mail 24.10.2014)



Joonis 13. Luugikomplekti D315 ristlõike mõõtmed; D – kaevuava läbimõõt



Joonis 14. Luugikomplekti D500 ristlõige ja mõõtmed; D – kaevuava läbimõõt

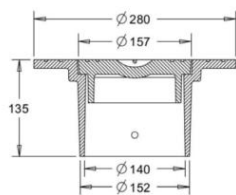


Joonis 15. Luugikomplekti D630 ristlõige ja mõõtmed; D – kaevuava läbimõõt

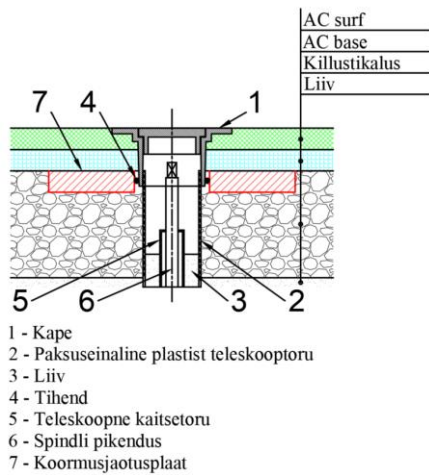
Kaped A1,B2,C3 koormusklassi tänavatel-teedel

- Kaped peavad vastama tüüpkaevukonstruktsioonide juhendi ja tehnovõrgu omaniku-valdaja nõuetele.
- Sõidutee pindadel tuleb kasutada koormusjaotusplaadiga, tihendita ja eeltöödeldud kontaktpindadega mittekolksuvaid kapesid.

Kiviparketi korral kasutada betoonplaadile toetuvaid kapesid.



Joonis 16. Kape külgvaade koos mõõtudega (näidis)



Joonis 17. Kape paigutus koos koormusjaotusplaadiga katendikonstruktsioonis

Restkaevuluugid. Neeluluugid.

Sõiduteele paigaldatakse nelinurksed ja ümarad restluugid, kus kasutatakse ujuvat tüüpi kaevupäist betoonist koormusjaotusplaadiga. Äärekivisse paigaldatav neeluluuk ja osaliselt rentsliis paiknev neeluluuk paigaldatakse kas jäigale betoonist kaevule või plastkaevu teleskoopтору peale ja fikseeritakse betoonpadjaga. Sõidutee pinnas olevate restluukide tugevusklass peab olema D 400. Neeluluukide puhul võib tellijaga kooskõlastatult kasutada ka luugikorpusi tugevusklassiga C 250.

Kaevukonstruktsiooni luugikorpus koos luugiga (koormusklassid D400 ja E600):

- Malm: GG25 või GG20 või GJL-200
- Kõvadus: 200 HB
- Kokkupuutepindade töötlus (siledus) R_a 12,5; DIN ISO 286-1. Valu täpsus ISO 8062. Kontaktpinnad luugi ja krae vahel peavad olema samast materjalist. Tihendite ja amortisaatorite kasutamine ei ole lubatud
- Luuk peab asetsema kaevupäise luugipesas stabiilselt ja mitte kolksuma. Kaevuluugi ja luugipesa vaheline summaarne külgtolerants peab olema vähem kui 4 mm.

Märkus: Kaevuluugi väljajätmise vältimiseks ekstreemsetes olukordades (suur liiklus- ja koormussagedus, kaevupäis asetseb rattajäljes) tuleb kooskõlastatult tänava-tee omanikuga D 400 koormusklassi päisekorpus välja vahetada koormusklassi E 600 vastu.

- Kinnituspoldid: Ümarpea, M16 roostevabateras AISI304 (A2); 6 tk (või joonis 4.10 /II-5/ ümarpeadega teineteise sisse keeratavad poldid). Tellijaga kooskõlastatult võib kasutada tavamutreid (vaata joonis nr 18). Väljaulatuv poldi osa max 20 mm
- Luugikomplekti kõrgus h_k – 200 mm; kraeserva väljaulatus välipinnast - 60 mm, kraeserva kõverusraadius sõltuvalt kaevu läbimõõdu suuruselt $R = 40 - 45$ mm.

Luugikomplekti kulumine ja eksploatatsioonilised tingimused

Kaevu luugikorpus koos luugiga on kulutoode, mis kuulub väljavahetamisele peale teatud funktsionaalsete omaduste muutumist:

- Kaevuluuk tuleb välja vahetada kui luugi muster on täielikult kulunud.
- Luugikomplekt tuleb välja vahetada kui luugi kontaktpinna kõrguse erinevus luugikomplekti serva kontaktpinnast on rohkem kui 5 mm. Samasugune vahetus tuleb teostada kui

luugikomplekti serv on kõrgemal sõidutee pinnast rohkem kui 5 mm ning viia korpuse pind sõidutee pinnaga tasa.

Teekattes asetseva kaevupäise ümbruse täitematerjal.

Kaevu ja kaevuümbruse äravajumisel tuleb kaevupäis koos ümbritseva asfaltpinna osaga tõsta ümbritseva sõidutee katte pinda kui 3 m latiga mõõdetuna piki sõiduraja rattajälge on kõrguste erinevus rohkem kui 18 mm. Kõrgemal asetsev kaevupäis (näiteks jäik kaevupäis) tuleb lasta ümbritseva sõidutee katte pinda kui erinevus ümbritseva kattega on suurem kui 5 mm.

Kaevupäise tõstmisel läbi juba paigaldatud asfaltkatte tuleb kaevuluugi korpuse ümbrus täita Vergumix Bitulan AC (või analoogse) seguga (vt lisa 1 – Vergumix segu tehnilised andmed). Kiirkivinemisel järgida täpselt kasutusjuhiseid vältimaks hilisemaid mahukahanismispragunemisi. Paksemakihilisel täitmisel võib alustäitematerjaliks olla ka tihe asfaltbetoon (näiteks AC surf). Kaevupäise teleskooptoru malm osa vööbatakse libestusmastiksiga (DRX-FC või analoog) vältimaks nakkumist asfaltbetoonmaterjaliga. Asfaltkatte ja täitematerjali vuugis kasutada bituumeni baasil valmistatud vuugimastiksit Bornit-Nahtkleber M (või analoogset). Täitematerjali paigaldamisel tuleb eelnevalt gaasipõletiga soojendada vuugipinda.

4. Kasutatud kirjandus

4.1. Normid, standardid, katsemeetodid

1. ASTM C295 – 98 Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete
2. ASTM C1260-14 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
3. ASTM C1293-18 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction
4. RILEM Recommended Test Method:AAR-1.1—Detection of Potential Alkali-Reactivity—Part 1: Petrographic Examination Method
5. RILEM Recommended Test Method: AAR-2—Detection of Potential Alkali-Reactivity—Accelerated Mortar-Bar Test Method for Aggregates
6. RILEM Recommended Test Method: AAR-3—Detection of Potential Alkali-Reactivity 38 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms
7. RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1 - Detection of potential alkali-reactivity 60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms
8. EVS 843:2016 Linnatänavad.
9. EVS-EN 1610:2007 Dreenide ja kanalisatsioonitorustike ehitamine ja katsetamine.
10. EVS-EN 124 Rest-ja kontrollkaevude luugid sõidu-ja kõnniteede aladele.
11. EN 12591:2009-Bitumen and Bituminous binders-Specifications for paving grade bitumens
12. Ehitusseadustik. RT I, 05.03.2015, 1.
13. Tee projekteerimise normid RT I, 07.08.2015, 14.
14. Tee ehitamise kvaliteedi nõuded. RT I, 07.08.2015, 1.
15. Tee seisundinõuded. RTI 15.07.2015,13.
16. InfraRYL. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Päälly- ja pintarakenteet. Rakennustieto OY 2017
17. Maa RYL 2010 Ehitustööde üldised kvaliteedinõuded. Pinnasetööd ja alustarindid.
18. Muldkeha ja dreenihi projekteerimise, ehitamise ja remondi juhised. Maanteeamet kk 05.01.2016 nr 0001
19. NEN 6720:1995, TGB 1990 Concrete Standards – Structural requirements and calculation methods (VBC1995), 2nd edition with revision A1 to A3 (in Dutch) NNI, Delft, 1995.
20. NEN-EN 206-1 Concrete – Part 1: Specifications, properties, manufacturing and conformity (in Dutch) NNI, Delft, 2001.
21. SRA (2005), *Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktioner ATB VÄG 2005 (Technical Guidelines for Road Structures ATB VÄG 2005)*. Part A-K. Report No. 2005:112, Swedish Road Administration, Borlänge, Sweden (in Swedish).
22. Standard-Betonbauweise nach ZTV-Beton 2007 auf Asphalttragschicht mit Waschbetonoberfläche (Waschbeton/Standard).
23. Standard-Betonbauweise nach ZTV-Beton 2007 auf Asphalttragschicht, überbaut mit ca. 2,5 cm Splittmastixasphalt "lärmmarm" (Beton/SMA-LA).
24. TL Beton-StB – Edition 2007/Translation 2012. Technical delivery terms for materials and material mixtures for base courses with hydraulic binders and concrete pavements (TL Beton-StB 07). Edition 2007/Translation 2012, 52 S. A5.
25. TP Beton-StB 10 "Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton".

26. ZTV Beton-StB – Edition 2007/Translation 2012 Additional technical conditions of contract and directives for the construction of base courses with hydraulic binders and concrete pavements (ZTV Beton-StB 07). Edition 2007/Translation 2012, 106 S. A5.
27. Tallinna tüüpkatendid. Kaevupäiste tüüpkonstruksioonid Tallinna tänavatel ja teedel. 2016. Tallinna Linnavalitsuse istungi 27.aprilli 2016 nr17 protokoll p-s. 35.)

4.2. Teaduslik-tehnilised uuringud

28. Tallinna teede ja tänavate tüüpkatendikonstruktsioonid ja nende rakendamine (2. etapp). TTÜ Teedeinstituut. Tallinna Kommunaalamet 2015.
29. Tallinna teede ja tänavate katendite deformatsioonide ja katete kulumise määramine, lähtudes liiklussagedusest ja teekatendi konstruktsioonist. Tallinna Tehnikaülikool. Tallinna Kommunaalamet 2017.
30. Tallinna teede ja tänavate katendite deformatsioonide ja katete kulumise määramine, lähtudes liiklussagedusest ja teekatendi konstruktsioonist, 2. etapp“. TTÜ Ehituse ja Arhitektuuri Instituut. Tallinn 2018.
31. Tallinna tänavatel ja teedel asuvate tehnovõrkude kontroll-, ühenduste- ja vaatluskaevude ning kapede konstruktsioonide täiustamine, tüüplahenduste ja paigaldustehnoloogiate juhendmaterjali väljatöötamine. TTÜ Teedeinstituut. Tallinna Kommunaalamet 2014.
32. Tehnovõrkude kaevukonstruktsioonide tüüplahendused ja nende rakendamine (2.etapp). Laserskaneerimise jätkuprojekt (5 tee ristlõiget ja 2 ühistranspordipeatust). TTÜ Teedeinstituut. Tallinna Kommunaalamet 2015.
33. Aavik, A. 2003. Methodical Basis for the Evaluation of Pavement Structural Strength in Estonian Pavement Management System (EPMS). Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, Thesis of Tallinn University of Technology. 152 p. ISSN 1406-4766; ISBN 9985-59-334-0
34. Houben, L.J.M.; Braam, C.R.; van Leest, A.J.; Stet, M.; Freney, J.W.; Bouquet, C. 2006. Backgrounds of VENCON 2.0 Software for the Structural Design of Plain and Continuously Reinforced Pavements. Proceedings, 10th International DUT-Workshop on Fundamental Modelling of Design and Performance of Concrete Pavements. Old-Turnhout, Belgium, September 15 – 16. 2006, pp. 1-20.
35. Houben, L.J.M. January 2009. Structural Design of Pavements. Part IV. Design of Concrete Pavements. Research Report CT4860. 110.p. Delft University of Technology. Delft, The Netherlands.
36. Huang, Y.H. 2004. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, ISBN 0-13-142473-4, p.785.
37. Ioannides, A.M.; Thompson, M.R.; Barenberg, E.J. 1987. The Westergaard Solutions Reconsidered. Proceedings, Workshop on Theoretical Design of Concrete Pavements, June 5-6, 1987, epen. Recod1, CROW, Ede, The Netherlands. Royal Institute of Technology.
38. Kim, D.; Park, S. 2011. Relationship Between the Subgrade Reaction Modulus and Strain Plate Loading Test. 11 p. In Proceedings of the 9th World Congress Railway Research. May 2011. Lille, France. Available from internet: www.ticservicegroup.com/au/wp-content/uploads/2015/04
39. Söderqvist, J. 2006. Design of Concrete Pavements – Design Criteria for Plain and Load Concrete [PDF]. TRITA-BKN. Bulletin 87. Licentiate Thesis. ISSN 1103-4270, 138 p. Available from internet: www.diva-potal.org/smash/get/diva2:11234/FULLTEXT01.pdf

40. The use of lithium to prevent or mitigate alkali-silica reaction in concrete pavements and structures. Publication No.FHWA –HRT-06-133 U.S.Department of Transportation. Federal Highway Administration. March 2007.
41. Willbach, P. 2017. Experimental section of concrete pavement urban road Tallinn. 29th International Baltic Road Conference. Tallinn.

4.3. Kasutatud juhised

42. Stabiliseeritud katendikihtide ehitamise juhised 2016-013
43. Killustikust katendikihtide ehitamise juhised 2016-012
44. Asfaldist katendikihtide ehitamise juhised. Maanteeamet kk 23.12,2015 nr 0314
45. Liiklusloenduse meetodika koormussageduse määramiseks 2009-7, Maanteeamet kk 02.04.2009.a nr 93.
46. Der Bau von Betonfahrbahnducken auf Zement-Merklaft StrassenStrassbenbau S2. Available from the internet: <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Zementmerkbl%C3%A4tter/S2.pdf>
47. Fahrbahndeckenbeton für Strassen. Zement-Merkblaft Strassenbau S1. Available from the internet: <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Zementmerkbl%C3%A4tter/S1.pdf>
48. Fugenprofile für Verkehrsfächen nach ZTV Fug-StB 01 in EPDM, 70 +/-5° Shore A. schwarz, fadenarmiert. MEDInagen Gessellschaft mgH. Available from the internet: www.medianagen.com
49. Concrete Pavement Maintenance / Repair. 2009. Report. 15.p. Available from internet: http://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library/Documents/CCAAREports/PavementRep
50. AB Svensk Byggtjänst and Cementa AB (2002), Handbok Betong på mark – Platsgjutna lösningar (Handbook Concrete Pavements – In-situ Casting Solutions). AB Svensk Byggtjänst and AB, Stockholm, Sweden, 256 pp, in Swedish.
51. CROW (2004), VENCON 2.0. Design Software for Concrete Roads. CD-ROM D925, CROW, Ede, the Netherlands, in Dutch.
52. EVKIS „Kanaliseerimise ja kaevude valik“ Rakendusuuring. 2013.
53. OÜ Gaasivõrgud nõuded „Võrguarmatuuri kaitsekaped“
54. AS Tallinna Vesi tehnilised nõudeid “Kaevude ja sulgeseadmete luugikomplektid“