



TRANSPORDIAMET



Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamise lähtekohtade alusuuring

Arendustöö

III etapp Lõpparuanne

TRANSPORDIAMET 2022

Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring III etapp Lõpparuanne

Versioon 1 (28.novemeber 2022)

Tellija: Transpordiamet

Teelise 4

Tallinn 10916

tel. 611 9300

Kontaktisik: Ann Siniväli (e-mail: Ann.Sinivali@transpordiamet.ee)

Töö täitja: IPT Projektijuhtimine OÜ

Aadress: Kalda 60A-2 10922 Tallinn

Telefon: 6 279 220

Koostajad: Peeter Talviste (e-mail: peeter@geotehnika.ee)

PhD, Eesti volitatud ehitusinsener geotehnika), tase 8

Ain Kendra (e-mail: ain@t-konsult.ee)

Eesti volitatud teedeinsener, tase 8

© Transpordiamet [2022]

Töö tellija on Transpordiamet, kuid töö tulemus ei pea olema kooskõlas Transpordiameti seisukohaga ega väljenda Transpordiameti poolt heakskiidetud arvamusi. Vastutus antud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest lasub täies mahus töö tegijal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

SISUKORD

EESSÕNA.....	4
MÕISTED.....	11
1 MULDKEGA JA KATENDI PROJEKTEERIMISE PÕHIMÕTTED.....	12
2 VAJALIK KANDEVÕIME.....	14
3 MULLATÖÖDE KONTROLLIMINE.....	16
3.1 MULLATÖÖDE KONTROLI KOLM SPETSIFIKATSIOONI.....	16
3.1.1 Lõpptoote kirjeldus (spetsifikatsioon)	16
3.1.2 Meetodi kirjeldus (spetsifikatsioon)	17
3.1.3 Kestvuse spetsifikatsioon.....	17
3.2 MATERJALIDE OMADUSED JA ERINEVAD PROJEKTEERIMISE	
LAHENDUSED.....	18
3.2.1 Püsiomadused	18
3.2.2 Olekuomadused.....	19
3.2.3 Tüüplahendused	20
3.2.4 Erilahendus	20
4 KVALITEEDI KONTROLI PROTSEDUUR.....	23
5 VAJALIKU KANDEVÕIME KONTROLLIMINE.....	24
5.1 ÜLDPÕHIMÕTTED	24
5.2 SOOME METOODIKA	25
5.3 KERGSEADMED	28
5.4 KOLMANDATE RIIKIDE SOOVITUSED KATSETE PINGEREŽIIMILE.....	30
5.5 KANDEVÕIME UURINGUD ERINEVAL PINGEREŽIIMIL.....	30
6 LÕPPJÄRELDUSED	33
6.1 KATALOOGIKATENDID JA NENDE ARVUTUSPÕHIMÕTETE VALIK	33
6.2 KVALITEEDIKONTROLI PÕHIMÕTTED.....	34
6.3 KONTROLI KATSED JA MEETODID.....	34
6.4 KATENDI ARVUTAMISE PROGRAMMID JA SEOS KONTROLI	
MEETODITEGA.....	35
6.5 TÄIENDAVAL JÄRELDUSED III ETAPI UURINGUS KÄSITLETUST	37

EESSÕNA

Kogu alusuuringu eessõna

Eesti riigiteede projekteerimisel on Transpordiamet sätestanud kohustuse kasutada katendite projekteerimisel „Elastsete teekatendite projekteerimise juhendit“ ja sellel juhendil põhinevat katendiarvutusprogrammi „KAP“. Mõlemad baseeruvad 1983. aasta Nõukogude Liidu katendite projekteerimisjuhendi BCH 46-83 (baasvariant) tõlgitud versioonil ja on Eestis kasutusele võetud lihtsustatult limiteeritud valikutega.

Seoses Eesti liitumisega Euroopa Liiduga 2004.a, tuli ka teedeehituse nõuded harmoniseerida EL-s kehtivale, mistõttu muutusid näiteks nõuded ehitustoodetele ja katsemetoodikatele ning põhimõtted pinnaste klassifitseerimisel.

Vene Föderatsiooni ja Euroopa Liidus kehtivate standardite vahel puudub ühene seos, seetõttu muudeti küll Transpordiameti (endine Maanteeamet) juhendmaterjalid võimaluste piires vastavaks EL ehitusmaterjalide ja katsete nõuetega, mida katendiarvutuses on üritatud kohandada EL nõuetele, jättes põhimõtted ja valemid samaks. Seega, kuna puudub üks-ühene üleminek Vene ja Euroopa pinnaste standardite vahel, sama nimetusega pinnastel on erinevad omadused, siis üleminekut täismahus ei ole lihtsalt võimalik teostada. 2021 aastal valminud uuring ja selle alusel koostatud raamistik „Tee muldkeha geotehniline projekteerimine. Tee projekteerimise normi ptk.5 kasutamise raamistik“ (IPT Projektijuhtimine OÜ töö nr.19-05-1490/2) küll osundab võimalusele läbi Mullatööde standardite EVS-EN 16907 senise projekteerimise süsteemi jätkamisele (seejuures kooskõlas EL regulatsiooniga), kuid osundab ühtlasi, et töö ette valmistamise, kvaliteedi kontrolli ja vastu võtmise tegevusi tuleks sel juhul oluliselt muuta viimaks viimased vastavusse Mullatööde standardiga.

Transpordiamet peab oluliseks ka võimalust kontrollida projekteeritud katendit koheselt pärast selle ehitamist tööde vastuvõtmisel, et hinnata kas tulenevalt eeldatavast koormusest on arvutustes ettenähtud katendi omadused saavutatud. Kuid tänapäeval puudub selgus adekvaatsete kontrollimeetodite osas, mis võimaldaks objektil kontrollida mullet ja konstruktsiooni kihte ning üheselt otsustada kas projekteeritud katendikihtide omadused on saavutatud kihtidena kui ka tervikuna ka ehitustööde tulemusel. Kuna katendiarvutuse metoodikad, mida maailmas kasutatakse, põhinevad enamuses samadel füüsikalistel alustel (elastse poolruumi teooria, sellel põhinev Odemarki valem jne) siis on mõistlik esmalt teostada teaduslik metauuring, kuidas Euroopas on Euroopa ehitusmäärusega sh (toote)standarditel põhinevalt katendiarvutused tehniliselt lahendatud, millel need baseeruvad ja teaduslikult hinnata millised lahendused võiksid Eestile põhimõtteliseks edasimineku aluseks olla.

Uuringu põhieesmärgiks on välja töötada adekvaatsed ajakohased katendi projekteerimise ja arvutamise baasalused, mis arvestavad nii Eesti eripärade kui ka EL seadusandlusega, samas säilitades võimalusel järjepidevuse (võimalusel võrreldavuse) seni kasutatavaga. Uuringu

alameesmärgiks on välja selgitada võimalikud erinevad katendi püsiomaduste kontrollmeetodid, mis võimaldaks objektile töö vastuvõtmisel kontrollida tee konstruktsiooni kihtide projekteeritud omadusi ning jooksvalt otsustada kas projekteeritud katendikihtide omadused on saavutatud kihtidena või tervikuna ehitustööde tulemusel arvestades ka tüüpkatendite võimalikku kasutuselevõttu, mida paralleelselt uuritakse.

Eurostandardite rakendamise põhialused on esitatud dokumentides:

EVS-EN 1990 seeria

EVS-EN 1991 seeria

Peamised käesoleva aruande koostamisel aluseks olnud materjalid, millega kooskõlas olemist käesoleva aruande koostamisel arvestati:

- [1] EVS-EN 1997-1:2006.
Eurokoodeks 7: Geotehniline projekteerimine. Osa 1: Üldeeskirjad.
- [2] EVS-EN 1997-2:2007.
Eurokoodeks 7: Geotehniline projekteerimine. Osa 2: Pinnaseuuringud ja katsetamine.
CEN/TC 250/SC 7 N1437 Eurocode 7 - Geotechnical design M515 SC7.PT6 1997-2
Ground properties (PT6) Oct-2020
- [3] prEN 1997-3.
Eurocode 7: Geotechnical design – Part 3: Geotechnical structures" dated April 2019
for review by CEN/TC 250/SC.
- [4] EVS-EN ISO 14688-1:2018.
Geotehniline uurimine ja katsetamine. Pinnase identifitseerimine ja liigitamine. Osa 1:
Identifitseerimine ja kirjeldamine.
- [5] EVS-EN ISO 14688-2:2018.
Geotehniline uurimine ja katsetamine. Pinnase identifitseerimine ja liigitamine. Osa 2:
Liigituspõhimõtted.
- [6] EVS-EN ISO 14689:2018.
Geotehniline uurimine ja katsetamine. Kalju identifitseerimise kirjeldamine ja
liigitamine.
- [7] EVS-EN 16907-1:2018.
Mullatööd. Osa 1. Põhimõtted ja üldeeskirja.
- [8] EVS-EN 16907-2:2018
Mullatööd. Osa 2. Materjalide klassifitseerimine.
- [9] EVS-EN 16907-3:2018
Mullatööd. Osa 3. Ehitusprotsess.

- [10] EVS-EN 16907-5:2018.
Mullatööd. Osa 5. Kvaliteedikontroll.

Käesoleval ajal (2020-21) on välja töötamisel uued Euroopa standardid, mis hakkavad asendama ülal loetletud standardeid. Kasutades uute standardite mustandversioone, on käesolev juhend viidud kooskõlla nendes toodud seisukohtadega. Mustandversioonide loetelu on toodud alljärgnevalt:

- [1]’ CEN/TC 250/SC 7 N1436. Eurocode 7 - Geotechnical design.
M515 SC7.PT6 1997-1 Geotechnical design - General rules (PT6) Oct-2020.
- [2]’ prEN 1997-2:202x
CEN/TC 250/SC 7 N1437. Eurocode 7 - Geotechnical design.
M515 SC7.PT6 1997-2 Ground properties (PT6) Oct-2020.
- [3]’ prEN 1997-3:202x
CEN/TC 250/SC 7 N1438. Eurocode 7 - Geotechnical design.
M515 SC7.PT6 1997-3. Geotechnical structures (PT6) Oct-2020.

Uuringu III etapi aruande eessõna

Käesolev aruanne on koostatud järjena töö I etapi vahearuandele „Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring. I etapi vahearuanne.“ (dets 2021) ja töö II etapi vahearuandele „Eestis kasutatava katendiarvutusmetoodika kaasajastamine lähtekohtade alusuuring. II etapi vahearuanne.“ (juuli 2022).

I etapp hõlmab erinevate riikide teede projekteerimise põhimõtete võrdlevat analüüsi, mille käigus kirjeldati nende põhimõtete erinevusi ja sarnasusi ja kujundati hüpoteesid edasiseks käsitlemiseks.

II etapis võrreldakse detailselt Eesti, Soome, Venemaa ja Rootsi teede projekteerimise etappe:

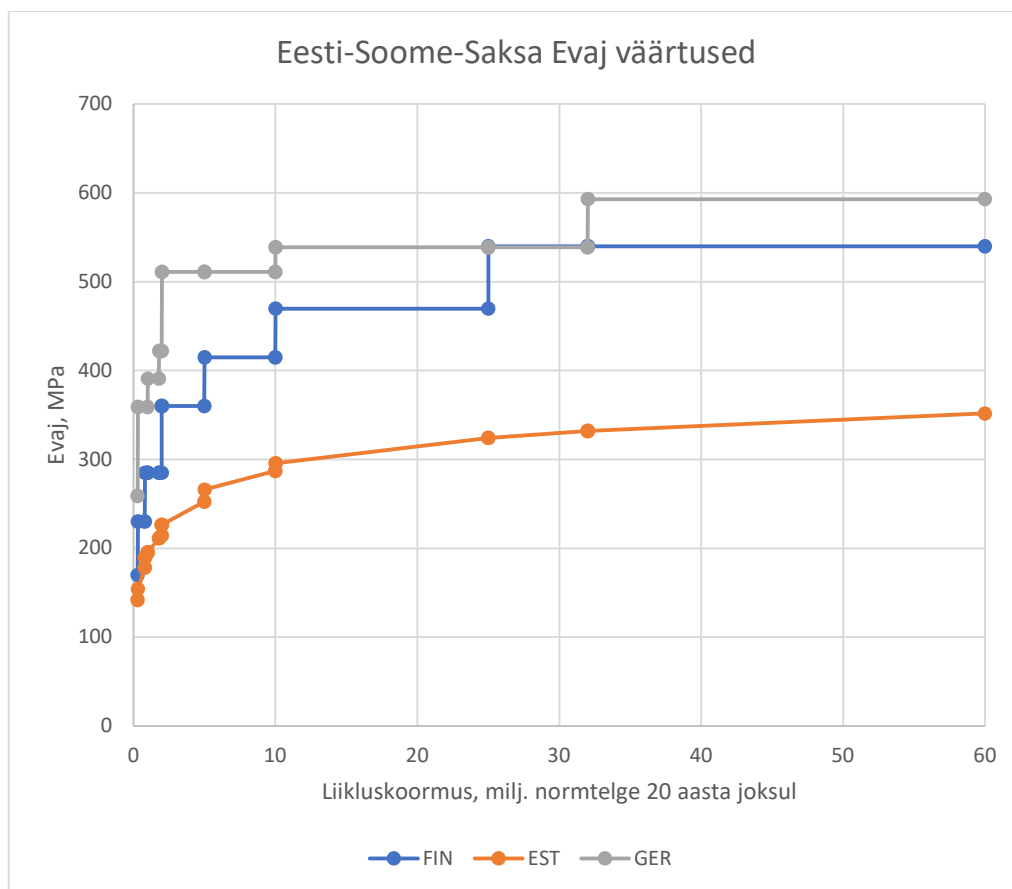
- liiklussageduse ja liikluskoormuse määramist ja selle alusel teede liigitamist;
- vajaliku kandevõime arvutamist;
- kataloogikatendite koostamise põhimõtteid ja kataloogilahendusi.

Peamise väljundid II etapi töödest on järgmised:

- Eesti ja Soome katendi projekteerimise tööetapid on väga sarnased välja arvatud vajaliku kandevõime arvutamine;
- Venemaa katendi projekteerimise põhimõtted on sarnased 1983.a. välja töötatuga (BCH-46-86), kuid hilisemad versioonid (2001 kuni 2021.a.) on rakendanud liikluskoormuse ja vajaliku kandevõime leidmisel tegureid, mille leidmise metoodika ja füüsikaline sisu ei ole sügavamaks analüüsiks kättesaadav. Väga sage siirdetegurite muutmine viitab pigem normide ebapiisavale põhjendatusele. Kui 1983.a. oli

normide koostamise aluseks põhjalikud uurimistööd, siis käesoleval ajal ei saa nende olemasolus, seega ka normimuutuste katsetega toetamises Venemaa riikliku süsteemi toimimise eripärast lähtudes väga kindel olla;

- Eesti ja Soome (aga ka Venemaa) normi kohane vajalik kandevõime on sama liikluskooormuse juures erinev kuni 33% erinev (*Joonis 1*). Erinevus on suurim suure liikluskooormusega teedel.
- Vajaliku kandevõime arvutusvalemi matemaatilise eripära tõttu ei ole võimalik väljundit ehk vajalikku kandevõimet vajalikul määral korrigeerida siirdetegurite muutmisega. Eestil puudub võimekus teadusuuringutega toetada oma arvutusvalemi välja töötamist. Soovitati Soome süsteemile üleminekut.



Joonis 1. Vajalik kandevõime Evaj Soome, Saksa ja Eesti normi kohaselt arvutatuna liikluskooormusest.

- Vajaliku kandevõime suuremat väärtust saab tagada vaid asfaldi kogupaksuse suurendamisega ja stabikihtidega asfaldi ja killustikaluse vahel. Nõuete muutmine muldkehas kandevõimele praktilist mõju ei oma.
- Praktiliselt kõik riigid on teede projekteerimiseks välja arendanud kataloogilahendused. Need on katsetööde ja teaduslike uuringutega toetatud lahendused, kus vastavalt liikluskooormusele ja aluspinnasele (piirkonna

geoloogilisest ehitusest tulenev või kui aluspinnased on väga nõrgad, siis nende asendamise või parendamisega saavutatud alus) on välja töötatud lahenduse kihipaksuste ja erinevatesse kihtidesse paigaldatud materjalidele esitatud materjalinõuete ja tihendamise metoodika näol. Eestil kataloogilahendusi ei ole ja puudub ka võimekus nende välja töötamiseks vajalike teadusuuringute ja katsetööde läbi viimiseks. Sellest lähtuvalt on soovitatud Soome kataloogide kasutusele võtmist.

Käesolev III etapp keskendus kvaliteedi kontrolli metoodikale.

Hüpotees 3: Soome ja Venemaa kvaliteedikontrollimeetmed saab viia kooskõlla EVS 16907.

Ettepanekud:

Analüüsitakse EVS-EN 16907 valguses erinevaid aluse, aluse erinevate kihtide ja katendi ehitusaegse ning järgse kontrolli rakendamise võimalusi. Tähelepanu pööratakse katsemeetodite viimisele vastavusse EVS põhimõtetega.

Analüüsitakse katsetihendamise või katsetööga seotud aspekte erilahenduste kasutamisel tee projekteerimisel. Määratletakse katsetöö vajalik sisu ja mastaap, katsetöö ajal kontrollitavad parameetrid ja kontrolli meetodid. Täpsustatakse katsetihendamise aruande sisu.

Hüpotees 4: Erinevad katendi kihtide elastsusmooduli mõõtmise metoodikad ei anna võrreldavaid tulemusi. Tuleb otsustada või valida missuguse metoodikaga hinnata erilahenduste vastavust projekteeritud elastsusmoodulile

Ettepanekud:

Analüüsitakse erinevate elastsusmooduli mõõtmise metoodikaid katseplaadi suuruse ja katsel rakendatava pinge valguses. Tehakse ettepanek kontrollkatsete tegemiseks erinevatel katendi ja aluse kihtidel arvestades erinevaid koormuseid (koormus ratta alla asfaldi pinnal, koormuse jaotumine asfaldi ja killustiku alustel kihtidel jne.).

Analüüsitakse Troxler-seadme kasutamise võimalusi tiheduse/mahukaalu ja niiskuse mõõtmiseks tööde erinevatel etappidel.

Käsitlus II etapi aruandes:

Hüpotees ei vaja teaduslikku käsitlemist. On üheselt selge, et erinevad katendi kihtide elastsusmooduli mõõtmise metoodikad ei anna võrreldavaid tulemusi. See tuleneb katendi ja aluse erineva kandevõimega kihtide järgnevusest ja paksusest. Otsustamine või valik missuguse metoodikaga hinnata erilahenduste vastavust projekteeritud elastsusmoodulile, tehakse vastavuses Soomes kasutusel oleva süsteemiga.

Ettepanekud

Kontrolli katsed ja metoodika rakendada vastavalt Soomes kasutatavaga. Detailid antakse uurimistöö III etapi lõpparuandes.

Hüpotees 5: Erinevate analoogseid tulemusi andvate katendiarvutusprogrammide kasutuselevõtt sõltub otseselt välja pakutud ja valitud Eesti teede projekteerimise uutest baasalustest.

Käsitlus II etapi aruandes:

Uue baasalusena nähakse Soome normistikul põhinevat süsteemi. Soome katendid arvutatakse Odemark valemil põhineva arvutuseeskirja alusel. Samal Odemark lahendil põhineb ka Eesti KAP. Seda, et Soome ja Eesti programmiga arvutatakse kandevõime katte pinnal sama või väga sarnane, on näidatud ka käesolevas uurimistöös. Olulist muutmist KAP-is vajab aga E_{vaj} leidmine liikluskooormuse alusel. Kuna selle muudatuse tegemiseks ei ole Eestis läbi viidud teaduslikke uurimistöid, soovitame käesoleva uuringu tulemina üle võtta Soome vastav valem.

Ettepanekud

Soome normidele üleminek võimaldab kasutada nende normide kohast tarkvara. KAP annab väljundina vananenud vajaliku kandevõime.

Hüpotees 6: Erinevate katendiarvutusprogrammide kasutusele võtmine tuleb analüüsida koos tüüp ja katalooglahenduste kasutuselevõtmise võimalustega (tervikliku lahendusena).

Käsitlus II etapi aruandes:

Vt. vastus hüpoteesile 5. Sellel põhjusel ei saa jätkata KAP kasutamist Soome projekteerimise normidele üle minekul. Soome normide üle võtmisel tuleb kasutada nende normidele vastavat tarkvara.

Hüpotees 7: Katendi ja muldkeha ehitamise kvaliteedi kontrolli katsed jagunevad püsi- ja olekuomaduste kontrolli katseteks ja neid saab rakendada vastavalt otstarbele, katse tehnilistele võimalustele ja EVS-EN 16907 seeria juhistele.

Käsitlus II etapi aruandes:

See hüpotees on pigem aksioom. EVS-EN 16907 on eesti keelsena ilmunud ja käsitleb probleemistikku detailideni.

Ettepanekud

Kontrolli katsete osa koostatakse uurimistöö III osas.

Hüpotees 8: Kontrollmeetodid ei saa sõltuda kasutatud katendi arvutamise programmist. Võrdlemiseks kasutatavad nn. eesmärkväärtused tuleb põhjendada, arvestades rattakooormuse jaotumist katendi ja muldkeha kihtidel, ning katsete koormusrežiim ja katseplaatide suurus tuleb vastavalt korrigeerida. Tüüp- või kataloogilahendusi kontrollitakse

materjalide püsiomaduste vastavuse ja tiheduse kaudu. Katendi ja muldkeha universaalkontrollimeetodit ei ole ja ei saa EVS-EN 16907 valguses määratlada.

Käsitlus II etapi aruandes:

See hüpotees on pigem aksioom. EVS-EN 16907 on eesti keelsena ilmunud ja käsitleb probleemistikku detailideni.

Ettepanekud

Kontrolli katsete osa koostatakse uurimistöö III osas.

Käesoleva aruande koostamisel kasutatud kirjandus:

1. Timo Saarenketo. The effect of new tyre type, tyre pressure and axle configurations of heavy trucks on asphalt pavement lifetime. Paha 2016.
2. Roadex prestudy: ROADEX_Axle_Tyre_Prestudy_15102014-Final.
3. USA 2019 (TR Virginia) 02-008_Final-Research-Report_Final.
4. Epävarmuudet ja luotettavuus geoteknisessä mitoituksessa. Väyläviraston julkaisu 37/2022.
5. Riho Eichfuss. Tee konstruktsiooni kihtide kandevõime ja selle mõõtmine seadmega Dynatest LWD. TTÜ lõputöö, 2018.
6. Rait Kopti. Geosünteedide mõju katendikihtide kandevõimele ja ettepanekud kvaliteedikontrolli nõuete korrigeerimiseks. TTÜ lõputöö, 2019.
7. IPT Projektijuhtimine OÜ töö nr.1-05-1490/3. Geosünteedide kasutamine tee konstruktsioonis. 2021.a.
8. IPT Projektijuhtimine OÜ töö nr.1-05-1490/2. Tee muldkeha geotehniline projekteerimine. Tee projekteerimise normi ptk 5 kasutamise raamistik. 2021.a.

MÕISTED

Aluspinnas käesolevas juhendis on looduslik pinnas või kalju, ümbertöötatud looduslik või tehispinnas, millele rajatakse või millel paikneb tee konstruktsioon või millesse kaevatakse või on kaevatud tee süvend. Muude geotehniliste struktuuride (sillad, tugiseinad, viaduktid jne) juures antud mõistet ei kasutata.

Elastusmoodul e. Young'i moodul (E) on materjali elastseid omadusi iseloomustav võrdetegur, normaalpinge ja suhtelise deformatsiooni suhe, määratakse pinge-suhtelise deformatsiooni graafiku lineaarselt osalt.

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Pinnase elastsusmoodul määratakse kompressiooniolukorras. Pinnase puhul ei ole tegemist pideva materjaliga, elastsusmoodulis sisaldub alati ka mingi jäävdeformatsiooni komponent. Selle tõttu kasutatakse teedevaldkonnas elastsusmooduli asemel suurust „**taastuv elastsusmoodul**“ (**M_r**) (*resilient modulus*), mis on pinge ja sellele vastava taastuva deformatsiooni suhe, sisuliselt E_{v2} . Pinge ja kogudeformatsiooni suhe on tinglikult E_{v1} .

Püsiomadused on pinnase või materjali omadused, mis käitlemisel ei muutu nagu näiteks lõimiskoostis ja Atterbergi piirid.

Olekuomadused on pinnase või materjali omadused, mis käitlemisel võivad muutuda nagu näiteks veesisaldus ja tihedus.

Pinnaserühma moodustavad on teatud püsiomaduste alusel teatud mullatööde ülesande lahendamiseks loodud ja tüüpomadustega iseloomustatud pinnased.

Tüüplahendus on pinnaserühmadesse liigitatud pinnaste tüüpomaduste abil arvutatud ja projekteeritud lahendus.

Kataloogilahendus on tüüplahenduse erijuht, esitatud pinnaserühmadena liigitatud materjalide järgnevuste ja kihi paksustena.

Erilahendus on lahendus, kus ei ole kasutatud tüüppinnaseid ja/või nende tüüpomadusi.

1 MULDKEGA JA KATENDI PROJEKTEERIMISE PÕHIMÕTTED

Muldkeha geotehnilise projekteerimise põhimõtted on kirjeldatud „IPT Projektijuhtimine OÜ aruandes nr.19-05-1490/2 – Tee muldkeha geotehniline projekteerimine. Tee projekteerimise normi ptk 5 kasutamise raamistik.“

Tee kandevõime leitakse Odemark valemiga. Sisendiks on aluspinnase kandevõime ja muldkehas kasutatud materjalide või pinnaste kandevõime väärtused. Saadud väärtust kontrollitakse võrdlemisega vajaliku kandevõimega, mille omakorda määrab liikluskoormus ja selle prognoos. Korrektuurid muldkehas kasutatud pinnase- või materjalikihtide omaduste ja paksuste osas võivad olla vajalikud külmakindluse ja vee ära juhtimise tagamiseks.

Muldkeha ja katendi geotehnilise projekteerimise protsess on kirjeldatud järgneva voogdiagrammiga 1.

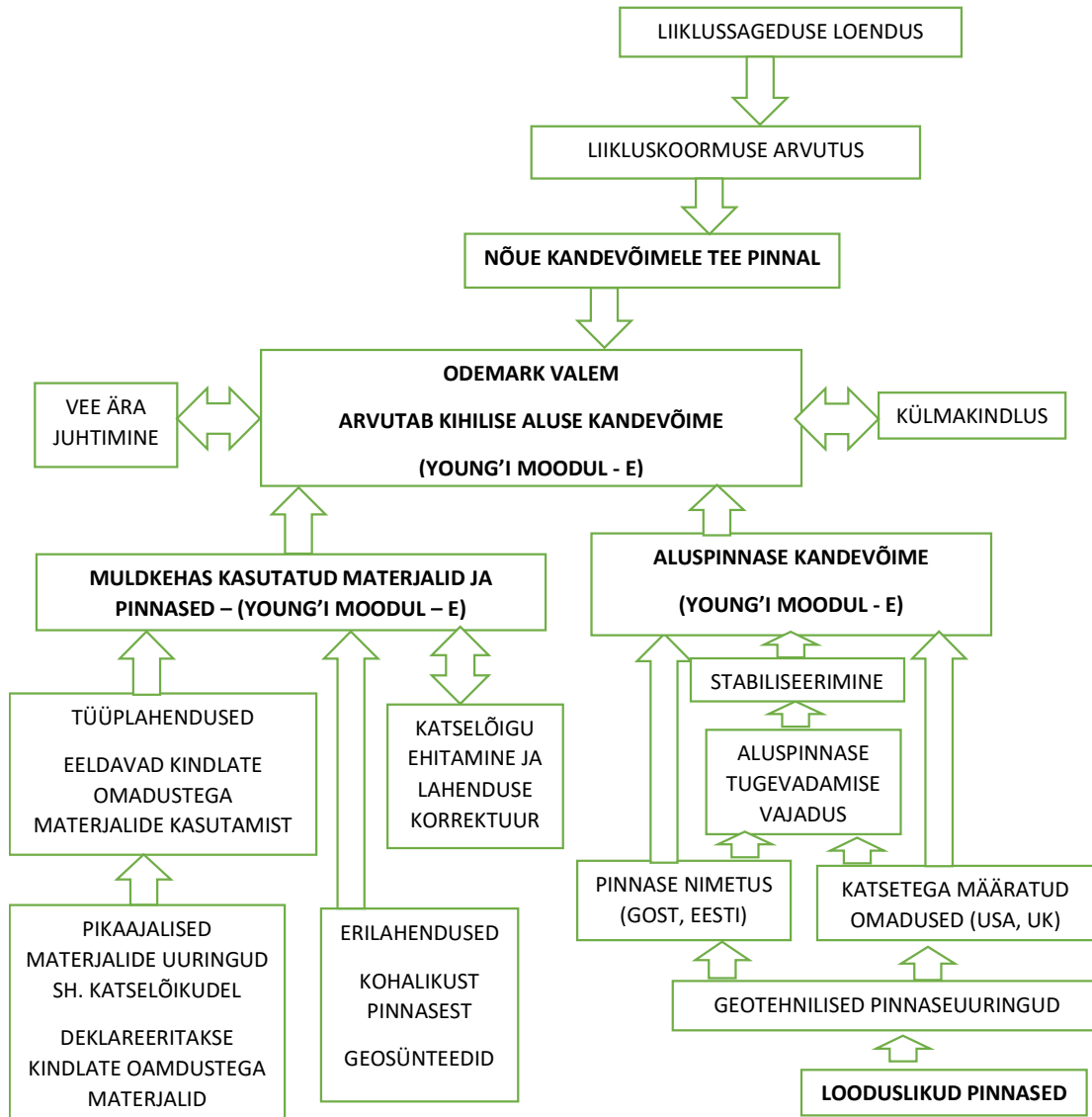
Tee projekti ülesandeks on järgmiste teede pikaajalisust tagavate ülesannete täitmine:

1. Tee stabiilsus – tee ei põhjusta maalihet aluspinnases ja tee jaoks rajatava süvendi nõlvad on stabiilsed.
2. Tee pinna kalded – tee mõjul toimuv aluspinnase tihenemine ja tihenemise poolt põhjustatud kallete muutus jääb normidega lubatud piiridesse.
3. Tee kandevõime – tee konstruktsioon on projekteeritud pikaajalisena vastavalt liikluskoormusele.
4. Tee külmakindlus – tee kerge külmudes jääb lubatud piiridesse.
5. Tee niiskuserežiim – tee konstruktsioonis ei tohi moodustuda ühelgi ajahetkel veelätsi.
6. Reostunud pinnased – teemaalt uuringutega tuvastatud reostunud pinnase käitlemine.

Ülesanded rakenduvad uue tee projekteerimisel, osaliselt ka olemasoleva tee rekonstrueerimisel:

	Ülesanne	Geotehniliste ülesannete rakendumine
1	Tee stabiilsus	Uue muldkeha korral
2	Tee vajumise prognoos ja tee pinna kallete kontroll	Uue muldkeha korral Tee laiendamise korral olemasoleva muldkeha kõrvale
3	Tee kandevõime	Uue muldkeha korral Tee laiendamisel olemasoleva muldkeha kõrvale Tee rekonstrueerimisel
4	Tee külmakindlus	Uue muldkeha korral Tee laiendamisel olemasoleva muldkeha kõrvale Tee rekonstrueerimisel (osaliselt)
5	Tee niiskuserežiim	Uue muldkeha korral Tee laiendamisel olemasoleva muldkeha kõrvale Tee rekonstrueerimisel (osaliselt)

Voogdiagramm 1. Muldkeha geotehnilise projekteerimise protsessi kirjeldus vajaliku kandevõime tagamisel.



Esmaseks ülesandeks tee projekteerimisel on minimaalselt vajaliku kandevõime (elastsusmooduli) tagamine tee katendi pinnal. Erinevad võimalused selleks on kirjeldatud baasuuringu I ja II etapi vahearuannetes.

Selleks et tagada tee konstruktsiooni kihtide vajalikud omadused on standarditesse sisse kirjutatud kvaliteedi kontrollimise süsteem. Kvaliteedi kontrollimise võimalustele Eurokoodide valguses käesolev uuringu III etapi aruanne keskendubki.

2 VAJALIK KANDEVÕIME

Erinevate riikide normide kohane vajaliku kandevõime leidmise metoodika on kirjeldatud ja analüüsitud II etapi vahearuandes ning põhiteesid on esitatud käeoleva aruande eessõnas. Käeolevalt on lisatud vajaliku kandevõimega seotud aspekte, mida varasemates aruannetes ei käsitletud.

Normide kohane vajalik kandevõime Eestis on sarnase liikluskoormuse juures oluliselt väiksem kui naaberriikides. Kandevõime ja deformatsioon on võrdelises seoses. Väiksem kandevõime (sisuliselt elastsusmoodul tee pinnal) tähendab, et Eesti teed ja nende katted taluvad pidevalt sarnase liikluskoormuse juures suuremaid deformatsioone. Seda nii kattekihtides, kui aluses. Suuremate deformatsioonide tõttu puruneb kate kiiremini. Suuremad deformatsioonid kutsuvad esile suuremaid jääkdeformatsioone ja nii kujunevad sõidujälgedesse roopad. Teede katete ja sageli ka aluskihtide taastusremondi vajadus kerkib päevakorda kiiremini.

Arvestada tuleb ka asjaoluga, et liikluskoormus ei suurene mitte ainult arvutuslikult, vaid ka reaalselt raskeveokite massi suurenemisena. Lahendusena nähakse telgede arvu suurendamist, eesmärgiks teljekoormuse jäämine samaks või isegi teljekoormuse vähenemine. Kuna seos deformatsioonide ja koormuse vahel on lineaarne, siis nähakse selles võimalust katte siirete vähendamiseks iga üksiku ülesõidu korral. Lisanduvate telgede mõju võetakse arvesse autorongide siirdeteguritega.

Siinjuures on tähtis osundada, et selline lähenemine on ekslik. Siirdetegurites arvestatakse küll lisanduvate telgedega, kuid ei arvestata, et sõiduki suurem telgede arv ja üha rohkem rehve koormamas sama rattajälge tähendab seda, et koormused järgnevad teineteisele väga väikese ajaintervalliga. Sisuliselt on tegemist tsüklilise koormusega. Nõrgad aluspinnased ja ka tee aluskihid ei deformeeru absoluutselt elastsena, vaid siiretes on teatud osa jäävdeformatsioonidel. Pikast sõidukikombinatsioonist tingitud läbipainetel ja deformatsioonidel ei ole piisavalt aega taastuda, enne kui järgmine järjestikune telg koormab sama kohta. Järjestikune teljekoormuse kordus põhjustab suuremaid jäävaid deformatsioone, mis viib kiirema roobaste kujunemiseni sõidujälgedes.

Lisaks tuleb arvestada koormuste superpositsiooni printsiibiga – erinevate allikate poolt põhjustatud koormused liituvad. Kuna järjestikused teljed asuvad lähestikku, on iga üksiku telje all koormused suuremad kui oleksid üksiku telje all, seda naabertelgedelt lisanduva koormuse tõttu. Eriti märgatav on koormuse kasv just sügavamal – aluse ja aluspinnase kihtides. Koormuse kasv põhjustab samuti suuremaid siirdeid ja suuremaid jäävdeformatsioone.

Teine oluline asjaolu, mida siirdetegurid ei suuda arvesse võtta on seotud poorirõhu tõusuga kattekihtide all. See on eriti oluline õhemate seotud kihtidega katete korral ning ajaliselt kevadisel teekonstruktsioonide sulamisperioodil. Kuna autorongi teljed järgnevad ajaliselt

väikese intervalliga, ei jõua poorirõhk koormatud alal taastuda ning kõrgendatud poorirõhk püsib pikalt. Suurenenud poorirõhu tõttu väheneb sidumata konstruktsioonimaterjalide tugevus, mis äärmuslikul juhul viib kiire kattekihtide pragunemiseni (ämblikuvõrgu sarnase pragude struktuuri kujunemiseni sõidujäljes).

Seda kõike võimendab veokite automaatne jäljes sõitmise süsteem, mille tõttu liikluskooormus kontsentreerub ühe sõidurea piires veelgi.

Mida õhukesemad on kattekihid, seda suurem on autorongide negatiivne efekt tee elueale. Teoreetilised eluea arvutused näitavad, et uued raskeveokite telgede ja rehvide konfiguratsioonid (eriti nn super-single ehk üksikute rehvide kasutamine) suurendavad oluliselt pingeid kattekonstruktsiooni ülaosas ja sellega põhjustavad suuremaid deformatsioone, millel on omakorda suur mõju tee elueale. Soomes on kirjeldatud teoreetilist mõju ka reaalsetel pinge- ja deformatsioonianduritega mõõdetud. Selgus, et mõju katenditele on eriti suur kevadistel sulaperioodidel, mil vett on aluses tavapärasest rohkem. Ainsaks erandiks on väga paksu kattega teed (üle 250 mm paksuse kattega).

Ainus võimalus kattekonstruktsiooni kandevõime suurendamiseks on konstrueerida suurema paksusega katend. Seda põhjusel, et vaid kattekihtide materjalide elastsusmoodul on suurem, kui vajalik kandevõime.

Jätkusuutlikkuse tagamiseks tuleb enne uute kattekihtide lisamist tagada tee konstruktsiooni optimaalne niiskuserežiim, st võimaldada vee ja niiskuse kiire äravoolu tee konstruktsioonist. Samuti on soovitatav parandada teekatte taset, kuna see võib vähendada roopaid, teekatte kahjustusi, konarusi ja vee ja peenosise uhtumist dünaamilise koormuse tingimustes.

3 MULLATÖÖDE KONTROLLIMINE

Peatükkides 3 ja 4 on resümeeritud võimalikult täpselt EVS-EN 16907-1, EVS-EN 16907-2, EVS-EN 16907-3 ja EVS-EN 16907-5 mullatööde kontrolli osa. Standardid moodustavad ühtse terviku. Esimesed kolm käsitlevad projekteerimise, materjalide valiku ja ehitamise põhimõtteid, viimane kvaliteedi kontrolli üldiseid printsiipe.

3.1 MULLATÖÖDE KONTROLLI KOLM SPETSIFIKATSIOONI

Pinnaserajatisele esitatavad projekteerimisnõuded mullatööde tegemisel on sätestatud tehniliste tingimuste ja ehitusjooniste komplekti abil. Mullatööde jaoks kasutatakse peamiselt kolme liiki kirjeldusi:

- Lõpptoote kirjeldus;
- Meetodi kirjeldus;
- Kestvuse kirjeldus.

Vastavalt valitud kirjeldusele (spetsifikatsioonile) erineb mullatööde kontrolli sisu.

3.1.1 Lõpptoote kirjeldus (spetsifikatsioon)

Sellisel juhul määratletakse tehnilises kirjelduses konkreetse materjali jaoks vajalik tihendusaste ja vajaduse korral jäikuse nõue, lähtudes kas kasutuspiirseisundi või kandepiirseisundiga seotud kriteeriumidest. Nõutavat tihendatuse taset väljendatakse tavaliselt valitud geotehniliste omaduste, nt maksimaalse kuivtiheduse protsendina või ettenähtud minimaalse jäikusena ja seda kontrollivad kohapeal läbiviidavad katsed.

Kui kasutatakse lõpptoote kohast kirjeldust (spetsifikatsiooni), määratletakse nõuetes tavaliselt üldised eesmärgid, mis tuleb saavutada, täpsustamata nendeni jõudmiseks kasutatavaid meetodeid. Tehnilises kirjelduses kirjeldatakse nõudeid, millele pinnaserajatis tervikuna peab vastama, ning need võivad hõlmata ka erinevaid osalisi sihtmärke, mida kontrollitakse (nt kihi miinimumnõuded enne järgmise kihi paigaldamist).

Pinnasetööde kontrollimiseks võib kasutada lõpptoote spetsifikatsiooni, tingimusel et lähenemine kontrollib piisaval määral erinevaid mullatöid mõjutavaid probleeme.

Eespool nimetatud kriteeriumid on seotud näitamisega, et tööd peaksid olema projekteeritud selliselt, et need sobivad kavandatud lõppkasutuseks. Nende eesmärkide saavutamiseks peaksid mullatööde teostaja ja projekteerija läbi arutama mitmeid praktilisi küsimusi ning selleni jõudmiseks tuleks tegelikult nõuda töö/spetsifikatsiooni meetodi kasutuselevõtmist.

Enamikul juhtudel on mullatööde läbiviimise ajal vaja rakendada mullatööde kvaliteedikontrolli süsteemi (isegi kui spetsifikatsioon seda ei nõua) tagamaks, et paigutatud materjal saavutab tõenäoliselt lõpptootele esitatavad nõuded ja on pikas perspektiivis stabiilne (nt tihendamisjärgsed niiskusesisalduse muutused ei põhjusta täitematerjali lubamatut halvenemist või vajumisi).

3.1.2 Meetodi kirjeldus (spetsifikatsioon)

Meetodi spetsifikatsioon määrab kindlaks, kuidas tihendamine tuleks läbi viia (tihendusseadmete liikide seisukohalt), töömeetodid, seadme läbimiste arvu ja tihendatava kihi lõpliku paksuse. Need tehnilised kirjeldused on välja töötatud teadusuuringute põhjal, kasutades seadme täismahulisi katseid (katsetöö katselõigul). Seda viisi tuleb kasutada kas täielikult või üldse mitte.

Kui pinnasetööde projekterija otsustab kasutada olemasolevat kehtestatud meetodi spetsifikatsiooni, rakendatakse projektis ka selle aluseks olevat klassifitseerimissüsteemi (vt klassifitseerimise kohta standard EN 16907-5 ja tihendusmeetodite kohta EN 16907-3).

Kui projektis kavatakse kasutada meetodi spetsifikatsiooni, peaks see olema hästi kindlaks määratud meetod, mis sobib töökeskkonna/kliima/täite liigi olemusega ning põhineb ulatuslikel labori- ja välikatsetel; hea tava näited on esitatud teabelisades C kuni H. Spetsifikatsioon peaks sisaldama piiratud arvu *in situ* tiheduskatseid tõendamaks, et meetodi abil saavutatakse ootuspärane tihendusaste.

Kui hästi tõendatud kogemuspõhist meetodi spetsifikaati ei ole, saab tihendusmeetodi sobivust hinnata ehitusplatsil läbiviidavate hästi kontrollitud katsetega, kasutades pakutud täitematerjali ja seadet. See lähenemine võimaldab tööde teostajal ehitusplatsi tööd efektiivselt hallata. Samas on selles olukorras tõenäoline, et tööd tuleb kinnitada ikkagi lõpptootespetsifikatsiooniga.

3.1.3 Kestvuse spetsifikatsioon

Kestvuse spetsifikatsioonide kohaselt peavad tööd olema määratletud pikaajaliste projektinõuete seisukohalt, mis on tavaliselt kehtestatud suhteliselt kõrgel tasemel. Näiteks võib kriteeriumid määratleda lõpetatud mullatöö käigus rajatava hoone või tee muldkeha ja katendi pikaajalise kasutuskõlblikkuse alusel. Sellise lähenemisviisi piiratus seisneb asjaolus, et kriteeriumite täitmata jätmine ilmneb alles pärast ehitamist, mil on sageli liiga hilja parandusmeetmete rakendamiseks. Kestvuse spetsifikatsioone rakendatakse tavaliselt hüdraulilise täitmisega moodustuvate muldkehade puhul (vt EN 16907-6), kuna paigalduse ajal on täitematerjali testimiseks vähe võimalusi. Kuivades tingimustes rajatud muldkehade puhul on siiski üldiselt eelistatav juhtida ehitustöid lõpptootespetsifikatsioonide järgi, mis kehtestavad mullatööde läbiviimiseks kindla järelevalve.

Kui on vaja esitada kestvuse spetsifikatsioon, tuleks see määratleda vastavalt nõutavale kasutuspiiriseisundile. Näiteks võib maapinna lubatud maksimaalset liikumist kindlaksmääratud ajavahemiku jooksul defineerida lahkvajumina esitades viimast lubatud gradiendina kindlaksmääratud lõigul, mis määrab maksimaalse lubatud vajumise suvalise punktis sellel lõigul. Kuigi kestvuse spetsifikatsiooni puhul võib arvesse võtta ainult lõpetatud mullatööde pinda, võib mullatööde projekteerija olla kohustatud arvestama nii mulde (mida mullatööde standard käsitleb) kui ka aluspinnase käitumist (mida mullatööde standard ei käsitle).

Seda võib pidada lepingulisest seisukohast koormavaks spetsifikatsiooniks, kuna sellega püütakse vastutust kõigi tulevaste sündmuste eest panna mullatööde projekteerijale ning seda võib praktikas olla väga raske jälgida. Seetõttu peaks mullatöödega tegelev töörühm käesoleva spetsifikatsiooni rakendamisel kasutama nõuetekohast kvaliteedikontrolli vormi.

Tuleb märkida, et standardis EN 16907-5 seda teemat ei käsitleta, kuna tegemist ei ole tihenduse kontrolliga seotud katsetega.

3.2 MATERJALIDE OMADUSED JA ERINEVAD PROJEKTEERIMISE LAHENDUSED

Materjalide omadused on jagatud püsi – ja olekuomadusteks. Püsiomadused on omadused, mis materjalide käitlemisel (näiteks tihendamisel) ei muutu. Olekuomadused on omadused, mis muutuvad materjalide käitlemisel (näiteks tihendamisel). Püsiomaduste kaudu defineeritakse tavaliselt teatud olekuomaduse saavutamiseks (struktuuri funktsiooni täitmiseks) vajalik materjal. Sageli defineeritakse vajalik materjal pinnaserühmade ja klasside kaudu (EN 16907-2). Olekuomaduste kaudu defineeritakse struktuuri vajalik omadus. Olekuomadusi on võimalik saavutada ka väljaspool defineeritud pinnaserühmasid või klasse olevate materjalidega, kuid see on vaja tõestada katsetööga.

3.2.1 Püsiomadused

Materjalide kasutuskõlblikkuse määratlemiseks ja kontrollimiseks võib kasutada järgmisi, sh. põhiklassifikatsioonis kirjeldamata, omadusi:

- Terade mineraloogia, sh esinevate savimineraalide tüüp, samuti terade litoloogia;
- Teke;
- Osakeste kuju;
- Osakeste tihedus;
- Optimaalne veesisaldus;
- Maksimaalne kuivtihedus;

- Terade või osakeste tugevus;
- Osakeste mehaaniline püsivus, sh tera kõvadus (mullatöödega ei kaasne olulist purunemist);
- Murenevus (sh külmumine-sulamine, kokkutõmbumine ja vee imendumine) ning osakeste vastupidavus;
- Külmakerkelisus;
- Keemiline püsivus ja vastupidavus;
- Tuhasisaldus.

3.2.2 Olekuomadused

Mullatöödel kasutatavate pinnaste klassifikatsioon põhineb vastavalt vajadusele järgmistel olekuomadustel:

- veesisaldus;
- Dreenimata tugevus ja rikutud pinnase tugevus;
- Dreenitud tugevus;
- Ühetelgne survetugevus;
- Tõmbetugevus;
- Jäikus / Young'i moodul (Elastsusmoodul või kandevõime);
- Pundumisvõime;
- Äkkvajumise potentsiaal (vee all);
- Tihedus või tihedusaste;
- Otse/Vahetu kandevõime indeks;
- Kalifornia kandevõimetegur (CBR);
- Filtratsioonimoodul;
- Kapillaarsus;
- Seismiline kiirus;
- Külmaskindlus;

3.2.3 Tüüplahendused

Tüüplahendused on klassifitseeritud pinnastest või materjalidest rajatud struktuurid.

Projekteerimisel ja projekti vastu võtmisel kontrollitakse tüüplahenduse vastavust aluspinnasele ja tee liikluskoormusele.

Ehitamise ajal kontrollitakse kasutatud pinnaste ja materjalide vastavust pinnase või materjali rühmale, mida projektis kasutati. Samuti kontrollitakse paigaldatud materjali tihedust ja kihi paksuse vastavust projektile. Geosünteedide korral kontrollitakse kihtide paksust ja paigaldatud geosünteedi vastavust projektile.

Tüüplahendused

- kihi paksuse kontroll (mõõdistus),
- materjalide kontroll (lõimis)
- tiheduse kontroll vastavalt standardi soovitusel sageduse osas

Kehtib nii tüüp- kui kataloogilahendustele.

3.2.4 Erilahendus

Erilahendused on klassifitseerimata pinnastest või materjalidest rajatud struktuurid.

Projekteerimine tehakse katsetöödel saadud andmetele tuginedes. Katselõigul testitakse materjale ja saavutatud kandevõimet, vajadusel muudetakse projektlahendust või vahetatakse välja materjalid

Ehitamise ajal kontrollitakse saavutatud kandevõimet. Kontrollitakse kuni saavutatakse vajalik kandevõime.

Erilahendused

- kihi paksuse kontroll (mõõdistus)
- saavutatud kandevõime kontroll plaatkoormus või dünaamilise katsega
- vajadusel korrigeeritakse lahendust kihtide paksuse muutmise või kihtide materjalide välja vahetamisega
- kontrolli teostatakse kuni lahendus saavutab vajaliku kandevõime

Kontrollimiseks tuleks valida sobivad näitajad EVS-EN 16907-2:2018 tabelist 13, ei ole vaja määrata kõiki näitajaid (boldiga on märgistatud Eestis teede ehituses kindlasti vajalikud määrangud):

Asend pinnaserajatises	Näitajad
Aluspinnas	pinnaserühm, granulomeetriline koostis, veesisaldus, plastsus , dreenitud nihketugevus, jäikus, CBR indeks, niiskustingimused , <i>Proctortihedus, keemiline koostis, tervistkahjustavad materjalid, materjali vastupidavus</i>
Drenaažikiht	pinnaserühm, granulomeetriline koostis , dreenitud nihketugevus, filtratsioonimoodul , tervistkahjustavad materjalid, materjali vastupidavus, keemiline koostis
Üldtäide (ja muldkeha südamik)	pinnaserühm, granulomeetriline koostis , veesisaldus, plastsus, Proctortihedus , CBR indeks, dreenimata tugevus, kandevõime, niiskustingimused , keemiline koostis, orgaanilise aine sisaldus, pundumis- ja äkkvajumise potentsiaal, mehhaaniline püsivus, keemiline püsivus, savide tundlikkus ja aktiivsus
Täide rajatise taga (üleminekutsoonid)	pinnaserühm, granulomeetriline koostis, veesisaldus, plastsus, Proctortihedus , CBR indeks, dreenimata või dreenitud nihketugevus, veejuhtivus, keemiline koostis, tervistkahjustavad materjalid, materjali püsivus vastupidavus
Välisnõlvad (külgtsoonid)	pinnaserühm, granulomeetriline koostis , veesisaldus, plastsus , tugevus, jäikus, Proctortihedus , CBR indeks, keemiline koostis, tervistkahjustavad materjalid, materjali vastupidavus
Tugevdatud pinnas	pinnaserühm, granulomeetriline koostis , veesisaldus, plastsus , Proctortihedus, CBR indeks, dreenitud nihketugevus, filtratsioonimoodul, keemiline koostis, tervistkahjustavad materjalid
Isoleeriv kiht	pinnaserühm, granulomeetriline koostis, veesisaldus, plastsus, dreenimata tugevus, Proctortihedus , filtratsioonimoodul, keemiline püsivus, savide tundlikkus ja aktiivsus
Töökihi alune ülemine kiht (aluskiht)	pinnaserühm, granulomeetriline koostis , veesisaldus, plastsus , tugevus, jäikus , CBR indeks, keemiline koostis
Töökiht	pinnaserühm, granulomeetriline koostis , veesisaldus, plastsus, külmakindlus , dreenimata tugevus, Proctortihedus , CBR indeks, keemiline koostis, organic content, tervistkahjustavad materjalid, külmakerkelisus
MÄRKUS 1 Mehaaniline püsivus hõlmab pundumise ja äkkvarisemisega seotud omadusi.	
MÄRKUS 2 Maapinnast välja kaevatud ja mullatööde protsessi kaasatud kaljude käitumist iseloomustatakse tavaliselt pinnasega sarnanevana.	

Erilahenduse välja töötamise ajal võib osutada vajalikuks tööstuslike katsetööde läbi viimine. Tööstuslikke tihendamiskatseid võib kasutada konkreetse materjali jaoks sobiva tihendamismeetodi valimiseks (eelkatseid) või et kontrollida, kas valitud tihendamisprotsess annab konkreetse materjali jaoks oodatud tulemuse (vastuvõtukatse). Sisuliste tulemuste

saamiseks tuleb katsed eelnevalt kavandada ja hoolikalt korraldada. Katse eesmärgid tuleb selgelt sõnastada koos tulemuste hindamiseks kasutatavate kvantitatiivsete andmetega.

Täpsustatakse järgmist:

- pinnase liik;
- kihi paksus (tihendamata ja tihendatud);
- tihendaja tüüp, töörežiim ja tihendamise energia;
- ülesõitude arv jne;
- kasutatud mõõtmismeetodid ning mõõtmiste arv, asukoht ja jaotumine;
- tulemuste analüüsimiseks ja järelduste tegemiseks kasutatav meetod.

Tulemuseks on katseprogramm. Katseprogrammis määratakse kindlaks katsetööde arv ja asukoht, kasutatav täitematerjal, selle kohale toimetamise ja kihiti paigaldamise viis, tihendamise protseduur ja mõõtmised. Määratakse kindlaks vajalik personal ja pädevus. Tihendamisseadmeid kontrollitakse vastavalt tootja spetsifikatsioonidele ja märgitakse kõik lahknevused. Proovitöö minimaalsed mõõtmed on pikkus 30 m ja laius kolmekordne tihendaja laius, kusjuures kihi paksuse mõõtmised tehakse keskmisel sõidurajal. Paigaldada tuleb vähemalt neli tihendatud kihti ja mõõta *in situ* tihedus kogu katsealal ühtlaselt jaotatud kohtades.

Katsete tulemused kogutakse ja analüüsitakse keskmise väärtuse ja standardhälbe alusel. Tulemused esitatakse aruandes, mille sisu täpsustatakse eelnevalt. Tavaliselt on tihendamiskatse esmane eesmärk näidata vastavust tihendamise nõuetele. Siiski võib uurida ka teisi parameetreid või materjali käitumisega seotud küsimusi, näiteks:

- deformatsioonimoodul plaatkoormuskatsete abil. Sellisel juhul tuleb katsed teha plaadi läbimõõdust vähemalt kaks korda suurema tihendatud täite paksusega, et vältida vastastikust mõju aluspinnasega;
- niduspinnaste nihketugevus *in situ* tiivikkatsete, penetratsioonikatsete või rikkumata proovide kogumise abil;
- teraliste pinnaste suhteline tihedus penetratsioonikatsete abil;
- *in situ* CBR väärtused;
- liigeldavuse toimimine;
- tihendamisprotsessi põhjustatud granulomeetrilise koostise muutused.

4 KVALITEEDI KONTROLLI PROTSEDUUR

EVS-EN 16907-2:2018 Lisa A sisaldab detailset loetelu mullatöödel kasutavate katsete ja nende standardite osas. Vastavalt vajadusele kontrollitakse kuni 40 näitajat, iga kontrollkatse kohta on olemas Euroopa standard ja on täpsustatud millise pinnase või materjali tüübi jaoks meetod sobib.

Mullatööde kvaliteedi kontrolli käsitlev standardi osa 5 – EVS-EN 16907-5:2018 Mullatööd. Osa 5: Kvaliteedi kontroll – käsitleb kvaliteedi kontrolli protseduuri loetledes selle erinevad osad vastavalt ajalisele järgnevusele:

- kvaliteedi tagamise programm (QA/QC programm), kirjeldab süsteemi ja koostatakse enne tööde algust;
- kvaliteedi kontrolli kava on detailne tööde kirjeldus (sagedus, meetodid, standardid, tulemuste vastavuse hindamise kord jne.) kvaliteedi kontrolli ajal;
- materjalide kontrollimine, see on mullatöödel kasutavate materjalide iseloomustamine standardi EN 16907-2 kohaselt;
- tihendamise kontrolli käsitus, so. meetodi või lõpptoote spetsifikatsiooni kohaselt;
- vastavuskatsete valiku põhjendus ja läbi viimine, so. konkreetsed kontrollkatsed objektil, nende tulemuste esitamine ja teostusprotokollide koostamine;
- täite rajamise järelevalve tööde jälgimisena ehitusobjektil.

Vaid kvaliteedi kontrolli protseduuri täielik järgimine so. standardi EVS-EN 16907-5:2018 kõikide osade läbi viimine kvaliteedi kontrolli jooksul, tagab muldkeha ja kattekihtide kvaliteedi.

5 VAJALIKU KANDEVÕIME KONTROLLIMINE

Käesolev peatükk keskendub teedehituses kasutatavate, erinevate kandevõime kontrolli meetoditele.

5.1 ÜLDPÕHIMÕTTED

Teede ehituse praktiliste lahenduste aluseks on pinnasemehaanika. Tee konstruktsiooni elemente käsitletakse elastsete kehadena. Pinnasemehaanika vaikumisi lihtsustuseks on:

- pinnas on pidev keskkond – tegelikult koosneb pinnas mineraalosakestest ja nende vahel olevast tühjast õhuga või veega täidetud ruumist;
- pinnas on homogeenne keskkond – tegelikult ei ole pinnas ei looduses ega tee konstruktsioonis homogeenne ei terastiku suuruse ega tiheduse poolest;
- pinnas on isotroopne – tegelikult koosneb pinnasemassiiv erineva omadustega kihtidest, ka tee konstruktsioonis on mitu erineva tiheduse ja koostisega kihti;
- pinnase koostiseks olevate osakeste endi omadused – osakese mehaaniline tugevus ja kuju – ei ole olulised – tegelikult kehtib see teatud piirideni.

Need lihtsustused ei põhjusta suuri lahknevusi teooria ja praktika vahel. Teede seisukohast on oluline tõdeda, järgmist:

- Teede koormus on tsükliline. Asjaolu, et tegelikult koosneb – erinevalt pidevat tahkest kehast – igasugune deformatsioon pinnases elastsest ja jäävast komponendist, viib aja jooksul suurte koormustsükli korduste korral üha kasvavate jäävdeformatsioonideni. Just jäävdeformatsioonide absoluutväärtuse miniseerimine on peamine kandevõime ja pikaajalise tagamise viis.
- Pinnased koosnevad erineva mõõtmega osakestest. Need osakesed võivad liikuda. Üks liikumise tagajärgi on tihenemine so. kihi paksuse vähenemine koormamisel. Tihenemise osakaal on suurem suurte pingete rakendumisel.
- Suurtest pinnaseosakestest koosnevate pinnaste korral omab tähtsust nii osakeste kuju kui tugevus. Osakesed võivad pindmiselt puruneda. Oluline on see killustikukihtide juures. Killustikukihti ei saa vaadelda pideva elastse kehana ja pinnasemehaanika reeglid kehtivad killustiku korral vaid tinglikult või osaliselt.
- Tingauto tingratta all kahanevad väikese koormatud pinna tõttu pinged sügavuse suunas kiiresti :
 - näiteks 0,16 m asfaldikihi all on pinge umbes 30...35% ratta kontaktpingest;
 - näiteks 0,4 m sügavusel liivakihil on pinge umbes vaid 5...8% ratta kontaktpingest;
 - absoluutväärtusena on asfaldi alusel killustiku kihil pinge 150...250 kPa;

- absoluutväärtusena on killustiku alusel liiva kihil pinge 30...45 kPa 0,4 m sügavusel ja 20 kPa ehk 3% ratta alusest pingest 0,66 m sügavusel.
 - Asfaldikihi paksuse suurendamisel langevad ka pinged killustikukihis ca 100 kPa-ni.
- Killustikukihi juures tuleb silmas pidada, et fraktsiooni 16...32 mm korral võime lugeda keskmiseks kontaktide arvuks, kus pinge realiseerub umbes 500...1000, fraktsiooni 32...64 korral on kontaktide arv osakeste vahel 8 korda väiksem. Näiteks jämeliiva korral on liivaterade vaheliste kontaktide arv ca 1000 korda suurem, peenliiva korral ca 30000 korda suurem. Nendele kontaktide kohtadele rakendub koormus. Mida suurem on kontaktide arv, seda väiksem on kontaktpinge. Seega on kontaktpinged osakeste vahel killustikus tuhandeid kordi suuremad kui liivas. Killustiku osade enda tugevus muutub oluliseks, sest purunemised kontaktides viivad mahu kahanemiseni. See väljendub jäävdeformatsioonides, mis omakorda põhjustab asfaldikahjustusi.

Kokkuvõtteks tuleb tõdeda, et kuigi teede projekteerimise teoreetiliseks baasiks on elastsusteooria ehk deformatsioonide elastsus ja lineaarsus, siis tegelikult ei käitu tee muldkeha ja katend kui elastne keha. Erinevate konstruktsiooni kihtide kvaliteedi kontrollil tuleb kindlasti silmas pidada järgmist põhimõttelist aspekti:

- **Erinevate konstruktsiooni kihtide kontrollkatsed tuleb teha pingete juures, mis neile rakenduvad hilisemalt eksploatatsiooni ajal. Liiga suured pinged tihendavad liiva ja purustavad killustikku ning annavad seetõttu eksitava tulemuse.**

Enamasti on viimasel ajal välja töötatud nõ. kiired elastsusmooduli (kandevõime) mõõtmise seadmed vaikimisi tingratta mõõtmises ja koormustega ning sobilikud vaikimisi tee katte pinnalt kandevõime mõõtmiseks. Kui nende seadmetega soovitakse mõõta elastsusmoodulit konstruktsiooni vahekihtidelt (killustikult või aluselt), tuleb rakendada teistsugust koormusrežiimi.

5.2 SOOME METOODIKA

Uuringu erinevatel etappidel on läbivalt tõdetud, et on otstarbekas üle minna Soome teede projekteerimise süsteemile. Selle tõttu on järgnevalt detailselt kirjeldatud kontrolli meetodeid ja kriteeriume Soomes.

Tee konstruktsiooni kirjeldus ja põhimõtted

Tee ehitamiseks vajalik platvorm peab olema piisava kandevõimega, et sellel saaks liikuda tee-ehituseks vajalik tehnika. Pinnased, mille arvutuslik elastsusmoodul on vähemalt 35 MPa, on selleks tavaliselt sobilikud.

Muldkeha ehitatakse juhul, kui tee projektkõrguse järgi on see vajalik. Muldkeha peal peab olema tagatud arvutuslik kandevõime vähemalt 35 MPa. Kui selline kandevõime ei ole saavutatud, tuleb kas asendada loodusliku pinnase ülakiht või pinnas vajalikus ulatuses.

Kui väikese kandevõime põhjuseks on liigniiskuse ja ebasoodne veerežiim, tuleb veetaset alandada piisavalt, et niiskustundlikud pinnased saavutaksid vajaliku kandevõime.

Samuti võib muldkeha või ka aluspinnase asendamine olla vajalik, et arvutuslik külmakeerge mahuks lubatud piiridesse. Seega, muldkeha materjalil peab olema elastsusmoodul vähemalt 35 MPa.

Muldkehale rajatakse jagav kiht. Selle materjaliks sobivad kruusad ja killustikud (0/63, 0/90 kuigi võimalikud on ka 0/125...0/250). Jagava kihi pinnal peaks kandevõime olema vähemalt 90 MPa.

Jagavale kihile rajatakse kandevkiht. Selle materjaliks sobib kvaliteetkillustik (max terasuurus 32/64, kuid ka siin kasutatakse optimaalse terastikulise koostisega segusid – paekillustike puhul siiski tuleb peenosise piirid teistsugused sättida). Sidumata kandevkihil peab arvutuslik kandevõime olema vähemalt 160 MPa. Jagav kiht võib olla rajatud ka stabiliseeritud materjalist (komplekstabi KS, tsementstabi TS, bituumenstabi BS paksusega vähemalt 15 cm), stabialuse arvutuslik kandevõime peab olema vähemalt 290 MPa.

Sõltuvalt koormussagedusest kavandatakse vajaliku paksusega kattekihid.

Soomega analoogiline lähenemine on ka Rootsis, kus sidumata aluse paksuseks on 42+8 cm (42 cm purustatud kaljupinnas, 8 cm 0/32...0/80 killustik) kõigi koormuste korral. Tee vajalik kandevõime saavutatakse kattekihi vajaliku paksusega.

Eeltoodud jagava ja kandva kihi kandevõime väärtused Soomes on orienteeruvad. Lisades kavandatavatele konstruktsioonikihtidele ka kihi maksumuse (materjal, transport, paigaldus), on võimalik konstruktsiooni optimeerida, mis võib tähendada ka seda, et jagava või kandva kihi arvutuslik kandevõime võib olla väiksem, seda juhul kui kogu konstruktsiooni arvutuslik kandevõime on tagatud.

Materjalide omadused ja kvaliteedikontroll

Projektis antakse nõuded materjalidele. Materjali tootja deklareerib, et toodetu vastab nõuetele. Objektile võetase kontrollproovid vastavalt QA/QC plaanile. Eeldatakse, et kui materjal vastab soovitud, on ette antud vajaliku tihendusteguri juures projektis kirjeldatud vajalik kandevõime saavutatud.

Liivpinnastel on tihendustegurit võimalik mõõta plaatkoormuskatsega, penetromeetriga või mahukaalu proovidega. Kui pinnases või materjalis esineb jämedamaid osiseid, penetromeeter ei sobi.

Maailmas kasutatakse tihendusteguri kontrolliks üsna laialdaselt radioaktiivsel elemendil põhinevaid seadmeid (Troxler ja analoogid).

Tihendus kvaliteeti hinnatakse ka teerullidele sisseehitatud kontrollseadmetega, mis mõõdavad vibratsiooni amplituudi – mida paremini on materjal tihendatud, seda väiksema amplituudi suudab teerull genereerida.

Mõõdetav kandevõime ja pingerežiim, etalonseade

Igal materjalil on tabelväärtusena vajalikule tihendustegurile vastav elastsusmoodul. Igal konstruktsioonil on kihtide paksuse ja kasutatud materjalide poolt määratud arvutuslik kandevõime. Soome teekonstruktsioonide kandevõime arvutused teostatakse Odemarki

valemiga. Kui kasutada Soome juhendites toodud pinnaste ja materjalide arvutusparameetreid, on arvutustulemused kontrollitavad plaatkoormuskatsetega mõõdetavate tulemustega (E_{v1} ja E_{v2}). **Plaatkoormuskatsetega mõõdetud väärtused on alati etalonväärtused.** Nende katsete korral saab katsetamiseks valida sobiva koormusrežiimi ja väikest koormuse korduste arvu tõttu ei toimu pinnase või materjali tihenemist katsetamise ajal.

Seotud kihtidelt mõõtmisel on plaatkoormuskatse väikeste mõõdetavate deformatsioonide tõttu suhteliselt ebatäpne. Välja on töötatud uudsed lahendused – kasutatakse erinevaid deflektomeetreid, mille mõõtetäpsus väikeste deformatsioonide juures on suurem:

- FWD – falling weight deflectometer,
- FFWD – fast FWD,
- HWD – heavy weight deflectometer,
- RWD – rolling wheel deflectometer,
- TSD – traffic speed deflectometer.

Mõõdetud deformatsioon koosneb alati kahest komponendist – elastsest ehk taastuvast ja plastsest ehk jäävdeformatsioonist. Mida suurem on koormus, seda suurem osakaal mõõdetud deformatsioonis on jäävdeformatsioonil. Seetõttu tuleb elastsusmoodulit mõõta ekspluatatsioonil kihile rakenduva tegeliku koormuse piirkonnas. Kindlasti ei tohi mõõtmisi läbi viia koormustega, mis mitmekordselt ületavad rakenduvat koormust. Seda nii plaatkoormuskatse kui deflektomeetriga katsetamisel.

Valmis kattel mõõtmisel tuleb kasutada seadmeid, mis võimaldavad mõõtmiseks kasutada kattel esineva koormusega lähedast režiimi:

- 700 kPa pinge 300 mm koormustalla all, kui raskeliiklus on lubatud,
- 250 kPa pinge 200 mm koormustalla all, kui raskeliiklus ei ole lubatud.

Mõõtmisel **katte alustel** kihidel tuleb arvetada, et killustikule rakenduvad veoki ülesõidul pinged 200...300 kPa ja alusel 50...100 kPa.

Plaatkoormuskatse metoodika aluseks on saksa standard DIN 18134, mis näeb ette 300 mm plaadiga mõõtmise 5-tonnise maksimaalkoormusega ning elastsusmooduli ehk kandevõime väärtuse arvutamise pingevahemikust 150...350 kPa (30...70% maksimaalsest koormusest ehk keskmiselt 250 kPa). Standardiseeritud on ka 600 mm ja 762 mm koormusplaatide kasutus. Koormus nende plaatidega katsetamisel on suurem, kuid pinge plaadi talla all madalam. Infrahituses eeldatakse, et võib kõik mõõtmised teha 300 mm tallaga.

Soome teede projekteerimisjuhistes on toodud tabel (Tabel 1), mis iseloomustab mõõdetud elastsusmoodulit erinevas koormusvahemikus.

Liiva ja peenkruusa elastsusmoodul ei muutu koormusvahemikus 40 ...160 kPa. Suurematel koormusel võib toimuda liiva täiendav tihendamine ja määratakse suurem elastsusmoodul.

Killustiku ja teiste jämeperde materjali katsetamisel on seos määratud elastsusmooduli ja koormuse vahel selge. Mida suurematel koormustel toimub katsetamine, seda suurem elastsusmoodul määratakse. Põhjuseks on kivitükkide kontaktpindadel toimuv mikropurunemine ühelt poolt ja kivitükkide ümber paigutumine ruumis koormuse all juba väga väikestel koormustel. Tähtis on, et nende protsesside osakaal koormuse kasvades killustiku puhul väheneb – suureneb kontaktide arv ja kontaktide pind, kivimitükkide nõrgemad kohad saavad purustatud jne. Nagu näha ei allu kumbki neist protsessidest elastse

poolruumi seadustele, kuid mõjutavad nii katse tulemust kui kirjeldavad tegelikke protsesse tee katendis ja katendi all.

Tabel 1. Erinevate materjalide elastsusmooduli sõltuvus koormusest.

Materiaali ¹⁾ ja sen lyhenne (tunnus ja E-moduulini nimellisarvo)	Jännitys eksponentti n ²⁾	Moduulit eri jännitystasoilla S (kPa)		
		S=40	S=70	S=160
Murske M280	0,25	200	230	280
Murske M200	0,25	140	160	200
Murske M150	0,25	105	120	150
Murske M100	0	100	100	100
Sora Sr280	0,25	200	230	280
Sora Sr200	0,25	140	160	200
Sora Sr150	0,25	105	120	150
Sora Sr100	0	100	100	100
Suodatinkerroksen hiekka Hk100	0	100	100	100
Suodatinkerroksen hiekka Hk70	0	70	70	70
Suodatinkerroksen hiekka Hk50	0	50	50	50
Suodatinkerroksen hiekka Hk35	0	35	35	35
Betonimurske BEM280	0,25	200	230	280
Betonimurske BEM500	0,25	355	405	500
Betonimurske BEM700	0,25	495	570	700
Masuunihiekka MaHk600	0,25	455	510	600
Masuunikuonamurske MaKu430	0,25	305	350	430
Kappalekuona KapKu350	0,25	250	285	350

Plaatkoormuskatsega hinnatakse ka tihendamise kvaliteeti, seda just killustik ja liivaluse mõistes. Antakse piirväärtus E_{v2} ja E_{v1} suhtarvule, mille suurema suhtarvu juures hinnatakse materjal ebapiisavalt tihendatuks. Praktikas tähendab see seda, et esimesel koormamisel liiv tiheneb liiga palju või killustiku tükid kas saavad liiga suures ulatuses oma asukohta või asendit muuta ja/või pindmiselt puruneda.

Lubatud suhtarvu arvuline väärtus sõltub E_{v2} väärtusest ja on seda suurem, mida suurem on E_{v2} väärtus (Rönkä, E. "Raitioteiden päällysrakenteen siirtymärakenteen optimointi. Tampereen yliopisto. 2019).

Tabel 2. Lubatud E_{v2}/E_{v1} suhe plaatkoormuskatsel erineva kandevõime korral killustikul (Rönkä 2019).

Kandevõime, MPa	E_{v2}/E_{v1}
<145	$\leq 2,0$
145...159	$\leq 2,1$
160...174	$\leq 2,2$
175...189	$\leq 2,3$
190...204	$\leq 2,4$
205...219	$\leq 2,5$
220...235	$\leq 2,6$
>235	$\leq 2,7$

5.3 KERGSEADMED

Allpool on kirjeldatud erinevate riikides välja töötatud ja Eestis kasutusel olevaid kergseadmeid tee ja selle konstruktsiooni kihtide kandevõime (elastsusmooduli)

kontrollimisel. Kõigi kergseadmete puhul tehakse igas mõõtepunktis 6...8 koormamisega katseseeria ja elastsusmoodul arvutatakse seeria viimaste katsete keskmisena. Seetõttu on eriti oluline, et katse käigus mõõdetavat alust ei tihendataks.

Soome

Soomes välja töötatud kergdeflektomeetriks on LOADMAN, mille klooniks Eestis on Inspector. See on suhteliselt jäiga kummipuhvriga seade, kus 10 kg raskus langetatakse fikseeritud kõrguselt jäigale plaadile.

Liival mõõtes varustatakse seade suurema 200 mm tallaga, uuematel mudelitel on võimalik ka 300 mm talle kasutamine. Ometi ületab ka suurema plaadi kasutamisel pinge talle all kordades tee konstruktsiooni vastavas kihis esinevat pinget. Probleemiks ongi asjaolu, et tänu suuremale pingele tihendatakse seadmega mõõdetav ala katseseeria käigus oluliselt paremini kui ümbritsev, mistõttu tulemus kajastab ainult üle tihendatud ala omadusi.

LOADMANi ja Inspector seadme juures on Eestis arendatud suunda, kus hinnatakse metoodika kohaselt arvutatud kandevõime (E_{v2}) ja minimaalse kandevõime suhtarvu järgi tihendamise kvaliteeti. Minimaalseks kandevõimeks (E_{v1}) loetakse teise katse (löögi) järgi arvutatud kandevõimet. Seda, kas teise löögi kandevõime vastab ka tegelikult plaatkoormuskatse esimese koormamise kaudu leitud E_{v1} väärtusele ei ole keegi kunagi uurinud ning selline seos põhineb P. Talviste subjektiivsel hinnangul, antud aastal 2001 ühe kindla ehitusobjekti raames kasutamiseks. Tänapäevaste teadmiste juures tuleb tõdeda, et teise löögi järgi arvutatud kandevõimet pigem ei saa käsitleda E_{v1} -na.

Oluline on ka, et üksi otse kandevõimet (elastsusmoodulit) määrav seade, ei võimalda määrata pinnase tihendustegurit (Proctori tihedust). Reeglina ei ole vajaliku kandevõime saavutamisel tihendusteguri väärtus ka praktiliselt kvaliteedi kontrollil oluline. Otse kandevõimet mõõtes rakendame lõpptoote spetsifikatsiooni, tihendustegurit mõõtes meetodi spetsifikatsiooni ning mõlema spetsifikatsiooni üheaegne rakendamine ei ole otstarbekas.

Saksamaa

Saksa koolkond on välja töötanud Zorn'i, HMP ja mitmed muud kergseadmed, mille põhiomaduseks on fikseeritud pinge 100 kPa 300 mm talle all. Selle tagab metallvedrudest puhver ja 10 kg raskus fikseeritud kõrguselt langedes. Tegemist on ideaalse seadmega liiva või aluspinnase kandevõime mõõtmiseks. Alusplaat püsib katseseeria jooksul paigal ja nii on tulemused ühtlasemad kui LOADMANil ja selle analoogidel.

Killustikaluses tuleb arvestada, et enamasti on selle kihi töödiapasooniks suuremad pinged.

Taani

Taani koolkond on välja töötanud Prima, Dynatest'i või analoogsed seadmed. Seadmete eripäraks on:

- vahetatavad või ümberlülitavad erineva suurusega tallad – 100 mm, 150 mm, 200 mm ja 300 mm,
- valitav koormuse langemiskõrgus ja muudetav võimalik koormus – 10 kg, 15 kg või 20 kg.

- Vajadusel on võimalik paigaldada täiendavad andurid, et mõõta vajumiskausi kuju.
- Talla suuruse, kõrguse ja kaalu valikuga on võimalik pingerežiim valida just selline, mis vastab konkreetse konstruktsioonikihi reaalsele tööolukorrale.

Taani seadmed sobivad kogu muldkeha ja katendi koormusspektri katsetamiseks – igale kihile saab valida katsetamiseks just selle kihi koormusrežiimile vastava metoodika.

5.4 KOLMANDATE RIIKIDE SOOVITUSED KATSETE PINGEREŽIIMILE

Nii Itaalia kui Vene juhendites on plaatkoormuskatse kasutamisel sidumata kihtide kandevõime mõõtmiseks kasutusel erinevad pingerežiimid.

Vene juhises liivalt mõõtes on koormuseks 50% standardsest ehk keskväärtuseks 125 kPa, killustikul 100% standardsest ehk 250 kPa.

Itaalia juhises on ka plaatkoormuskatsega mõõtmisel kasutatava pinge muutus astmeline: 100 kPa aluspinnasel ja muldkehal, 200 kPa aluse alakihil ja 300 kPa aluse ülakihil.

Taani soovitused on mõõta liival 100 kPa ja killustikul 300 kPa režiimis.

Plaatkoormuskatse teostatakse tavaliselt kahe koormamisega – esimesel koormamisel arvutatud tulem on E_{v1} , teisel koormamisel (max koormus 80% nominaalsest) E_{v2} ning nende kahe tulemuse suhtarv E_{v2}/E_{v1} kirjeldab tihendamise kvaliteeti. Ka siin ei ole tegemist konstandiga – mida suurem on fikseeritud E_{v2} tase, seda suurem on ka lubatud suhtarv.

5.5 KANDEVÕIME UURINGUD ERINEVAL PINGEREŽIIMIL

Mõõdetud väärtuse sõltuvus pingerežiimist

Mõõtetulemus sõltub pingest, mille juures mõõtmised tehtud.

Liival on see sõltuvus väike ja väljendub alles väga suurte koormustel, mille juures liiva katse ajal tihendatakse. "Suured koormused" on aga alati kordades suuremad, kui liivakihi muldes rakenduvad eksploatatsiooni aegsed koormused. Seega – madalas, liivakihi tegelikult tee konstruktsioonis vastavas ja veidi seda ületavas koormuspiirkonnas (40-160 kPa) võib lugeda liiva kandevõime konstantseks. Seda väljendab ka Soome normide vastav tabel 1. Katsetel > 160 kPa pingetel tuleb liiva tihenemisega katse ajal arvestada (R. Eichfuss, 2018).

Killustikel ja teistel jämedateralistel materjalidel (paeliiv, purustatud ehitusmaterjal jne.) on mõõdetav kandevõime sõltuvus pingerežiimist oluline. Mida suurema maksimaalse terasuurusega on materjal, seda markantsem on mõõdetava kandevõime sõltuvus pingest.

Põhjuseks on katseplaadi mõjutsooni jäävate pinnaseosakeste kontaktide arv, mille kaudu koormus edasi kantakse. Mida väiksem kontaktide arv, seda suurem kontaktpinge kontakti kohas. Mida suuremad pinnaseosakesed, seda väiksem kontaktide arv. Suure kontaktpinge tõttu osakesed võivad kontaktpinnal puruneda, suurendades kontaktpinna suurust, osakesed võivad ka ümber paigutuda, selliselt et suureneks kontaktide arv jne. Sellised protsessid on

intensiivsemad koormamise alguses, esimestel väikestel koormustel. Uue, suurema koormuse rakendusel, on kirjeldatud protsessid väiksema mõjuga ja mõõdetav kandevõime väärtus kasvab.

Nii liiva kui killustiku katsetamisel viib suure koormusrežiimi rakendamine kandevõime ülehindamisele.

Katsete arv

Kandevõime määramise etalonseadmeks on plaatkoormuskatse, mis on ajamahukas ja kallis. Kergseadmega jõuab sama aja jooksul teha oluliselt suurema hulga katseid. Selle tõttu on erinevate riikide standardites suurendatud vajalike katsete sagedust kergseadmega katsetamisel. Näiteks Saksa normides on määratud mõõtetiheduseks plaatkoormuskatsel 1 katse 6000 m² kohta, kergseadmega 1 katse 600 m² kohta. Siit tulenevalt, võiks plaatkoormuskatse asemel kergseadme kasutusel mõõtepunktide arv olla vähemalt kümne kordne. Selline lähenemine annab lisaks kandevõime väärtusele olulise info ka konstruktsiooni homogeensuse kohta ning võimaldab defektsed ehk puuduliku kandevõimega alad kontuurida ja korda teha enne järgmise kihi paigaldust.

Vajaliku kandevõime taseme määratlus ja võimalik hälve

Kuna materjalid on alati teatud määral mittehomogeensed, siis hajuvad ka mõõtetulemused. Lisaks, saavutab konstruktsioon projekteeritud omadused pärast kõigi kihtide paigaldust ja järeltihenemist. Eriti liivade (vähemal määral ka killustiku korral) katsetamisel ilmneb fakt, et konstruktsioonikihi pinnakihi omadused on erinevad võrreldes olukorraga, kus enne mõõtmist seade süvistatakse pinnast veidi sügavamale. Selline skeem on kirjeldatud ka plaatkoormuskatse standardis.

Tulenevalt nii mõõtetehke pinnase niiskuse erisusest sügavuti, aga ka reaalsest tihendatuse taseme muutusest sügavuti, on loogiline, et mõõtmistulemus võib jääda madalamaks arvutuslikust.

Inglismaa normides on rakendatud nn. 80%/50% põhimõte. Kui kandevõimet mõõdetakse vahetult kihi peal, on tõenäoliselt kihti kandevõime sügavamal 100% tagatud, kui kihi pinnal mõõdetakse keskmiselt 80% projektsest kandevõimest. Kergseadmega mõõtes tehakse ca 10 korda rohkem mõõtmisi kui plaatkoormuskatsega mõõtes. Tulemused hajuvad ning seetõttu peaks rakendatakse 80% nõue viie viimase mõõtepunkti keskmisele (libisev keskmine). Samal ajal ei tohi ühegi punkti tulemus olla väiksem kui 50% projektsest kandevõimest. NB - isegi sel juhul on lubatud üle 50% madalama tulemuse korral läbi viia korduskatse esimesele mõõtepunktile suhteliselt lähedal, et veenduda, kas anomaalia oli juhuslik või süsteemne. Seega tuleb kvaliteedi kontrolli projektis kirjeldada, kas kontrollkatsed tehakse kihi pinnalt või sügavamal ja võiks pindmise katsetamise korral sisaldada nõuet katsetulemustele arvestades 80 ja 50% taset keskväärtusele ja minimaalsele väärtusele seerias.

Soome praktika on lähedane – jagaval kihil on lubatud keskväärtusena vähemalt 85% projektsest kandevõimest ja kandval kihil 90% projektsest kandevõimest. Lisaks on Soome juhises kirjeldatud, et projektis toodud arvutuslik vajalik kandevõime väärtus muldkeha vahekihtidel on sihtväärtus. Kui saavutatud mõõtetulemus jääb sellele alla, tuleb kontrollida

materjali määratlust ja kihipaksus ning teostada kontrollarvutused Odemarki valemiga. Kui ka siis jääb arvutatud tulemus projektis kirjeldatule alla, tuleb inseneril otsustada edasised tegevused (näiteks asfaldikihi paksuse suurendamine). Seega ei ole tegemist üheselt kihi vastuvõtutingimusega.

Suur kergseadmetega tehtavate katsete arvu rakendamisel kvaliteedi kontrollis on ülal kirjeldatud statistilisel lähenemisel põhimõtteliselt oluline erinevus tänase Eestis rakendatud praktikaga, mis on kirjutatud MKM määruksesse nr 101, 03.08.2015 (kehtiv redakstioon 23.11.2020) "Teede ehitamise kvaliteedinõuded".

Pakume välja järgmise tabeli 3, mis lähtub esimesel real kirjeldatud arvutuslikust või plaatkoormuskatsega määratud kandevõimest E_{v2} ning arvestab katsetingimusi (dünaamiline seade) ja pingerežiimi katsel ning 80%/50% põhimõtet.

Tabel 3. Kontrollväärtused erineva koormsurežiimi rakendamisel kandevõime kontrollil.

Määramise viis killustikul või liival	Ühik	Ev2									
Vajalik Ev2 /või plaatkoormuskatsest	MPa	180	150	120	100	80	70	60	50	45	
Dyna_100kPa (300 mm tald) keskmine*	MPa	132	115	99	82	66	58	50	45	41	
Dyna_300kPa (150 mm tald) keskmine*	MPa	156	136	117	97	78	68	59	53	48	
Dyna_100kPa (300 mm tald) min**	MPa	106	92	79	66	53	46	40	36	33	
Dyna_300kPa (150 mm tald) min**	MPa	125	109	93	78	63	54	47	42	39	

*5 mõõtmise jooksev keskmine

**minimaalne lubatud väärtus katseseerias

6 LÕPPJÄRELDUSED

6.1 KATALOOGIKATENDID JA NENDE ARVUTUSPÕHIMÕTETE VALIK

Hüpotees 1

Kõige lähedasemad Eestis kasutavale teede projekteerimisele on Soome ja eriti Venemaa normistik ja nii on nad ilmselt sobivaimad Eesti tulevaseks projekteerimise ja arvutamise baasaluseks, sest need arvestavad nii Eesti eripärade kui ka EL seadusandlusega, samas säilitades võimalusel järjepidevuse (võimalusel võrreldavuse) seni kasutatavaga katendiga. Venemaa iseenesest mõistevana, kuna Eesti normistik on algselt olnud Venemaa 1983.a. normistiku tõlge, mida on aastate jooksul muudetud. Muudatused on olnud segased ja vasturääkivad ning 2017 aasta Elastsete katendite projekterimise juhises ei ole säilinud enam Venemaa juhise struktuuri ja osaliselt on moondu sealne sisu. Soome normistik on kõige lähedasem Venemaa normistikule ja sellel on ilmselt ajaloolised põhjused. Soome iseseisvuse algaastatel moodustas insenerkonna tsaari Venemaal väljaõppe saanud insenerid.

Hüpoteesi käsitus

Käesoleva uuringu II etapis põhjendati, et Venemaa normistikule tagasi ülemineku on raskendatud, kuna aastatel 2001-2021 toimunud normi muudatuste sisu ja põhjendused ei ole üksikasjades kätte saadavad.

Võrdlus Soome normistikuga näitas, et enamikes aspektides on Eesti ja Soome normistikud kas väga sarnased või täiesti sarnased. Vaid liikluskoormuse alusel vajaliku kandevõime määramises on põhimõtteline lahknevus. Aruandes on analüüsi tulemusel hinnatud Eestis kasutusel olev seos liikluskoormuse ja vajaliku kandevõime vahel vananenuks, muutunud liiklusolude jaoks mitte sobivaks. Seost ei ole võimalik ajakohastada vaid siirdetegurite muutmisega, vaid see vajaks põhjalikku muutmist. Põhjendusega, et muudes osades on Eesti ja Soome normistikud ühilduvad, tehakse ettepanek minna üle Soome normistikule täies mahu, mis võimaldaks säästa ajas ja vahendites teaduslikule uurimistöole eelpool käsitletud seose ajakohastamisel.

Ettepanek

Valmistada ette ülemineku Soome teede projekteerimise normidele.

6.2 KVALITEEDIKONTROLLI PÕHIMÕTTED

Hüpotees 2

Tulevase katendiarvutuse alusel ehitatavate tee konstruktsioonide kvaliteedikontrolliks sobivad kõige enam Soome ja Venemaa kvaliteedikontrollimeetmed.

Hüpotees 3

Soome ja Venemaa kvaliteedikontrollimeetmed saab viia kooskõlla EVS 16907.

Hüpoteesi käsitus II etapi ja käesolevas aruandes

Vene normidele tagasi üleminekut ei peetud mõistlikuks.

Soome normidele üle minnes tuleb rakendada ka Soome kvaliteedi kontrolli ja tagamise normistik. Soome normistik on kooskõlas EN 16907 põhimõtetega.

Käesolevas aruandes on kirjeldatud Soome normistiku kvaliteedi kontrolli detaile sõltuvalt tee projekteerimise meetodist ja kasutatud materjalidest EN 16907 raamistikus. Selleks, et Soome teede projekteerimise põhimõtted täielikult rakendada, tuleb need eesti keelde tõlkida. Vajalikud seadmed kontrollkatsete läbi viimiseks on Eestis olemas.

6.3 KONTROLLI KATSED JA MEETODID

Hüpotees 4

Erinevad katendi kihtide elastsusmooduli mõõtmise metoodikad ei anna võrreldavaid tulemusi. Tuleb otsustada või valida missuguse metoodikaga hinnata erilahenduste vastavust projekteeritud elastsusmoodulile

Hüpoteesi käsitus käesolevas aruandes

On analüüsitud, nii erinevate normatiivsete baaside võrdlusena, kui erinevate riikide ja Eestis läbi viidud rakendusuuringute tulemuste kokkuvõttena, erinevaid katendi ja selle all paiknevate kihtide elastsusmooduli (kandevõime) metoodikaid ja tulemusi. Erinevate tulemuste saamise põhjused on kirjeldatud ning on välja pakutud tabelid, mis võimaldavad määrata katsete eesmärkväärtused sõltuvalt vajalikust kandevõimest ja katseseadmest/katsetamise režiimist.

Ettepanekud

Kontrolli katsed ja metoodika rakendada vastavalt Soomes kasutatavaga. **On koostatud kontrollkatsete eesmärkväärtuste määratlemise ettepanek (tabelina) sõltuvalt vajalikust kandevõimest ja katsetamise režiimist.**

6.4 KATENDI ARVUTAMISE PROGRAMMID JA SEOS KONTROLLI MEETODITEGA

Hüpotees 5

Erinevate analoogseid tulemusi andvate katendiarvutusprogrammide kasutusele võtt sõltub otseselt välja pakutud ja valitud Eesti teede projekteerimise uutest baasalustest.

Hüpoteesi käsitus käesolevas aruandes

Uue baasalusena nähakse Soome normistikul põhinevat süsteemi. Soome katendid arvutatakse Odemark valemil põhineva arvutuseeskirja alusel. Samal Odemark lahendil põhineb ka Eesti KAP. Seda, et Soome ja Eesti programmiga arvutatakse kandevõime katte pinnal sama või väga sarnane, on näidatud ka käesolevas uurimistöös. **Olulist muutmist KAP-is vajab aga E_{vaj} leidmine liikluskoormuse alusel.** Kuna selle muudatuse tegemiseks ei ole Eestis läbi viidud teaduslikke uurimistöid, soovitame käesoleva uuringu tulemina üle võtta Soome vastav valem.

Ettepanekud

Soome normidele ülemineku võimaldab kasutada nende normide kohast tarkvara. KAP annab väljundina vananenud vajaliku kandevõime ja ei ole kasutatav.

Hüpotees 6

Erinevate katendiarvutusprogrammide kasutusele võtmine tuleb analüüsida koos tüüp ja katalooglahenduste kasutuselevõtmise võimalustega (tervikliku lahendusena).

Hüpoteesi käsitus käesolevas aruandes

Vt. vastus hüpoteesile 5. **Sellel põhjusel ei saa jätkata KAP kasutamist Soome projekteerimise normidele üle minekul. Soome normide üle võtmisel tuleb kasutada nende normidele vastavat tarkvara.**

Hüpotees 7

Katendi ja muldkeha ehitamise kvaliteedi kontrolli katsed jagunevad püsi- ja olekuomaduste kontrolli katseteks ja neid saab rakendada vastavalt otstarbele, katse tehnilistele võimalustele ja EVS 16907 seeria juhiste.

Hüpoteesi käsitus käesolevas aruandes

See hüpotees on pigem aksioom. EVS-EN 16907 on eesti keelsena ilmunud ja käsitleb probleemistikku detailideni. Transpordiamet võik kehtestada need standardid enda hangetes soovituslikust tasemest kohustulikena, Soome süsteemi erisusi arvestades.

Ettepanekud

Kontrolli katsete osa on käsitletud vastavuses Eurostandardi 16907 soovitustele. Soome süsteemile üle minek tagab täieliku ühilduvuse nende soovitustega.

Hüpotees 8

Kontrollimeetodid ei saa sõltuda kasutatud katendi arvutamise programmist. Võrdlemiseks kasutatavad nn. eesmärkväärtused tuleb põhjendada, arvestades rattakoormuse jaotumist katendi ja muldkeha kihtidel ning katsete koormusrežiim ja katseplaatide suurus tuleb vastavalt korrigeerida. Tüüp-või kataloogilahendusi kontrollitakse materjalide püsiomaduste vastavuse ja tiheduse kaudu. Katendi ja muldkeha universaalkontrollimeetodit ei ole ja ei saa EVS 16907 valguses määratleda.

Hüpoteesi käsitus käesolevas aruandes

See hüpotees on pigem aksioom. EVS-EN 16907 on eesti keelsena ilmunud ja käsitleb probleemistikku detailideni.

Ettepanekud

Kontrolli katsete osa on III etapi aruandes esitatud ja tuleb rakendada.

6.5 TÄIENDAVAD JÄRELDUSED III ETAPI UURINGUS KÄSITLETUST

1. Pinnasetööde kvaliteedi kontroll algab kvaliteedi tagamise ja kontrolli plaani (QA/QC plan) koostamisest. Kvaliteedikontrolli lahutamatuks osaks on protseduuri järgimine kogu EN 16907-5 määratletud järjestuses ja mahus (ptk 4).
2. Tööde kvaliteedikontrolli katsete määratlus ja sisu sõltub mullatöödel rakendatud spetsifikatsioonist (lõpptoote-, meetodi- või kestvuse spetsifikatsioon) ja valitud lahendusest (tüüp- või erilahendus).
3. Geotekstiilide mõju konstruktsioonis ei avaldu otseste kandevõime väärtuste kasvuna ja nende mõju ei ole otseste meetoditega seetõttu kontrollitav. Lähtuda tuleb tootjate pikaajalistest katsetest ja juhenditest.
4. Plaatkoormuskatsed on kahe staatilise koormamisega etalonkatsed ja sobivad nii katte kui selle all olevate muldkeha kihtide katsetamiseks. Kahel koormamisel saadud kandevõimete kaudu on võimalik leida E_{v2} ja E_{v1} suhtarv ning hinnata kihi tihendatust (Tabel 2).
5. Kergkatseseadmed (deflektomeetrid) rakendavad dünaamilist suurte kordustega koormamist ja nende kasutamisel tuleb järgida õiget, hilisemas tööolukorra kihile rakenduvat koormusrežiimi. Vale koormusrežiimi kasutamisel määratakse katsel tegelikkusest suurem kandevõime.
6. Kergkatseseadmed (deflektomeetrid) on mõeldud lõpptoote spetsifikatsiooni (kandevõime) kontrollimiseks ja ei võimalda E_{v2} ja E_{v1} suhtarvu ega kihtide tihendusteguri määramist.
7. Tihendusteguri leidmiseks tuleb määrata kihi kuivmahukaal kas proovikehal või Troxler seadmega ja võrrelda seda etaloniga - Proctori tihedusega.
8. Raskete veokite mõju katte olukorrale ei muutu paremaks/väiksemaks telgede arvu lisamisega. Väikese intervalliga järgnevad teljed põhjustavad kattekihtide ja aluse suuremat deformatsiooni, mis viib otseselt katendi eluea lühenemiseni.
9. KAP-i siirdetegurite muutmine ei võimalda tegeliku liikluskoormuse modelleerimist ja vajaliku kandevõime määratlemist.
10. Ainus võimalus Eesti riigiteede eluea tõstmiseks on võtta arvesse muutunud liikluskoormused ja suurendada vajaku kandevõime väärtuseid.
11. Ainus võimalus kattekonstruktsiooni kandevõime suurendamiseks on konstrueerida suurema paksusega katend.