

TALLINNA TEHNIKAKÕRGGKOOI

Sven Sillamäe

**AUTOTEEDe KATENDITE
TUGEVDAMINE GEOVÕRKUDEGA**

LÕPUTÕÕ

Ehitusteaduskond

Õpperühm: TEI – 81

Tallinn 2009

SISUKORD

Sissejuhatus.....	5
1. Põhimõisted.....	7
2. Tootmine.....	9
3. Kasutusvaldkonnad ja tööpõhimõtted.....	11
3.1. Katteta teed.....	13
3.2. Kattega teed.....	15
3.3. Geosünteedide paiknemine konstruktsioonis.....	18
3.4. Mis vahe on jäikadel ja pehmetel võrkudel?.....	19
4. Omadused.....	21
4.1. Toormaterjalid ja nendest tulenevad omadused.....	22
4.2. Geosünteedide füüsilised omadused.....	23
4.3. Geosünteedide funktsioonid.....	27
4.4. Varutegurid.....	29
5. Geovõrkudega tugevdatud elastsete katenditega teede projekteerimine.....	30
5.1. AAHSTO katendiarvutusmeetod.....	30
5.1.1. Projektsuurused.....	31
5.1.2. Arvutusvalemid.....	34
5.1.3. AAHSTO meetodi järgi aste-astmelt katendi arvutamine.....	37
5.2. Perkinsi meetod.....	39
6. Geovõrkudega tugevdatud siirdekateenditega teede projekteerimine.....	42
6.1. Giroud – Noiray (1981) ja Giroud - Ah-Line-Bonaparte (1985).....	43

6.1.2. Limiteeringud	47
6.2. Giroud-Han (2004).....	47
6.2.1. Projektsuurused.....	48
6.2.2. Kandevõimefaktor.....	50
6.2.3. Potentsiaalne kandevõimefaktor	52
6.2.4. Lubatud roopa sügavuse ja potentsiaalse kandevõime faktori seos.....	52
6.2.5. Armeerimine ja kandev kiht	54
6.2.6. Giroud ja Han (2004) meetodi limiteeringud	55
6.2.7. Giroud-Han'i meetodi arvutusvalem	56
6.2.8. Arvutamine	57
6.3. U.S. Army Corps of Engineers	58
6.3.1. Giroud-Han (2004) ja U.S. Army Corps of Engineers arvutusmeetodite võrdlus.....	60
6.4. Tenax'i hetkel kasutatav arvutusmeetod	61
6.4.1. Kahekihiline süsteem	61
6.4.2. Kandva kihi lagunemine.....	63
6.4.3. Potentsiaalne kandevõimefaktor	65
6.4.4. Projekteerimislahendus	67
6.4.5. Projekteerimissuurused	68
6.4.6. Kalibreerimine ja limiteeringud.....	68
6.4.7. Arvutamine	69
7. Geosüntetide paigutus ja kasutus	71
8. Arvutusmeetodite kasutusvõimalused Eestis	77
9. Kokkuvõte	80
10. Summary	81
11. Kasutatud kirjandus	82
12. Lisad.....	84
Lisa 1. Kihitegurite ja struktuurarvu määramise joonised	85

Lisa 2. CBR-arv	89
Lisa 3. Teekonstruksiooni näidis	92

SISSEJUHATUS

Seoses maavarade vähenemisega ja elavnenud ehitamise tõttu viimasel sajandil on hakatud otsima võimalusi, kuidas ehitada ökonoomasemalt kasutades kõiki ehitusmaterjale võimalikult efektiivselt. Kuidas ehitada sama asja oluliselt väiksema materjalikuluga, võimalikult lihtsalt ja nii väikse töömahuga kui võimalik? Teedehituses on laialdaselt hakanud levima geosünteedid. Erinevate katsetuste tulemusel on neil leitud olevat väga efektiivne toime. Nende abil saab näiteks ületada vähese kandevõimega alasid, kus varem tuli ette võtta suuremahulised pinnasevahetustööd; nad pakuvad kaitset ehitades üle nõrkade pinnaste tänu võimele käituda kui „lumeking“, mis ei vaju pehmesse pinda. Tänu geovõrkude omadustele saab oluliselt vähendada ka kasutatavaid ehitusmaterjale, seejuures kaotamata kvaliteedis või saab tõsta konstruktsiooni eluiga. Igal juhul paistab, et tänu geosünteedidele on võimalik kokku hoida suur hulk raha ja väärtuslikke ehitusmaterjale ning parandada nende omadusi.

Eestis kasutatakse geovõrke veel võrdlemisi vähe. Peamine põhjus tundub olevat selles, et ei teata projekteerimisvõtteid ja seetõttu on raske näidata paberil, missugust kasu nad tegelikult toovad. Pea kõik kasutamised Eestis on siiani tehtud nõ igaks juhuks, lisamaks vaid lisagarantiid. Juba ammu on räägitud sellest, et karjäärid tühjenevad ja killustikku ning muud materjali on kohati raske saada. Suureks probleemiks on ka teede püsimine järjest kasvava liikluse oludes. Geovõrkude omadused lubaksid teoreetiliselt kõike seda parandada. Aga missugustel alustel tehakse vastavad arvutused, mille tulemusel väidetakse, et geovõrgud toimivad just nii?

Antud lõputöö eesmärgiks on selgitada välja, missugused teooriad domineerivad maailmas geovõrkude alal autoteede armeerimise osas alumistes kihtides – kuidas nad töötavad, kuhu nad tuleks konstruktsioonis paigaldada, et saavutada maksimaalset tulemust ning eelkõige projekteerimispõhimõtted – mis teguritega tuleks arvestada, mis on tähtsamad omadused ja

missugused on arvutuskäigud; kuidas näidata paberil, et geosünteeet toob kasu. Eesmärgiks on ka vaadelda, kas levinumad arvutusmeetodid sobiksid kasutamiseks Eestis.

AS Teede Tehnokeskuse poolt läbi viidud uurimuse „Maanteede remondil geotekstiilide ja armeervõrkude kasutamine“ (2008) lõpparuande kokkuvõtte soovitusel on kirjas: „Viimasel ajal on Eestis aga jäikaid võrke üha rohkem kasutama hakatud (näiteks Tensari võrgud). Nende kasutamine ja ekspluatatsioon vajaks samuti uurimist ja võrdlemist seni kasutatud geovõrkudega.”[5: 83]

Lähtuvalt antud soovitusel ja vajadusest uurida jäikade geovõrkude toimivust, on antud lõputöö peamiselt keskendatud just nende arvutusmeetoditele ja tööpõhimõtetele. Jäigad geovõrgud on valitud uurimiseks ka seetõttu, et erinevate spetsialistide ja tootjate arvates sobiksid just need kõige paremini kasutamiseks teedeehituses aluste armeerimisel, see-eest on Eestis siiani enamasti kasutatud pehmeid geovõrke. Miks on jäigad võrgud paremad ja miks arvavad spetsialistid, et tuleks kasutada just neid? Milles seisneb nende eelis ja kuidas tulevad nende omadused kõige paremini esile? Saamaks selgemat pilti geosünteeetidega armeerimisest ning lisamaks võrdlusmomenti, on töös käsitletud mõningal määral ka geotekstiile ning pehmeid geovõrke.

Märkusena tuleb veel öelda, et jäikadest geovõrkudest, vastavalt tootmistehnoloogiale, on valitud lõputöös käsitlemiseks augustatud ja tõmmatud (punched and drawn) pinnasegeovõrgud, kuna nad on ainuke ühtse struktuuriga tooted ja seetõttu teistest geovõrguliikidest oluliselt erinevad.

1. PÕHIMÕISTED

Geovõrku võib defineerida järgnevalt: polümeerne struktuur, ühe- või kahe-suunaline; tööstuslikult valmistatud leht, mis koosneb regulaarse võrgustikuna elementidest, mis on omavahel ühendatud kas ekstruuderdamise, sidumise, punumise või keevitamise teel ning mille avad on suuremad kui koostekomponendid. Tegemist on võrgutaolise materjaliga, mis koosneb omavahel seotud paralleelsetest lamedatest ribadest, mille vahel olevad avad peavad olema piisavalt suured, et haarduda ümbritseva materjaliga. Kasutatakse geotehniliste, keskkonnaalaste, hüdrogeoloogiliste ja transpordiga seonduvate insenerihitiste koosseisus.

Tootmismeetodite ja –tehnoloogiate järgi jagatakse geovõrgud järgnevalt:

- ühesuunaline geovõrk - geovõrk, mis võtab vastu ühes suunas märgatavalt suuremat tõmbejõudu (kas parallel- või ristisuunas) kui teises;
- kahe-suunaline geovõrk – geovõrk, mis suudab nii piki- kui ristisuunas vastu võtta sarnaseid tõmbejõude;
- seotud geovõrk – geovõrk, milles kiud (niidid), õige nurga all, on ühendatud sidumise teel;
- punutud geovõrk – geovõrk, milles kiud (niidid), õige nurga all, on ühendatud punumise teel;
- kootud geovõrk – geovõrk, milles kiud (niidid), õige nurga all, on ühendatud kudumise teel;
- keevitatud võrk – geovõrk, mille ribad on omavahel ühendatud keevitamise teel;
- augustatud ja tõmmatud võrk (punched and drawn) – geovõrk, mis venitatakse üks või kahe suunas tervikmaterjalist, mis eelnevalt on augustatud. Antud töö keskendub peamiselt antud liigile.

ASTM D1388 kohaselt jaotatakse geovõrgud vastavalt jäikusele järgnevalt:

- jäik geovõrk – geovõrk paindejäikusega >1000 g-cm. Algmaterjalideks on polüetüleen (PE) ja polüpropüleen (PP) ning nende tootmistehnoloogiateks on keevitamine ning augustamine ja tõmbamine;

- pehme geovõrk – geovõrk paindejäikusega <1000 g-cm. Algmaterjaliks on polüester (PET) ning tootmistehnoloogiateks sidumine, punumine ja kudumine.

Kandva kihi mõiste all mõeldakse lõputöös sideainetega töötlemata mineraalmaterjalidest kihte, näiteks killustik- või kruusalust. Elastsete katetega teede puhul kandva kihi peale tuleb asfalt.

Jagav kiht¹ on spetsiaalselt kandva kihi alla ja aluspinnase peale ehitatud lisakiht. Selleks võib olla mulde materjal (mõnikord ehitatakse ajutiste teede katted otse looduslikule aluspinnasele; sellisel juhul mullet ei eksisteeri, on vaid kandev kiht), mille koosseisu võib kuuluda ka spetsiaalne drenikiht, ehitatuna näiteks liivast, kruusast või muust mineraalmaterjalist. Jagava kihi ülesanded on eelkõige suurendada veelgi konstruktsiooni tugevust – vähendada koormusest tekkivaid nihkepingeid aluspinnases – ja/või drenida vett konstruktsioonist välja.

Kattega tee all on antud lõputöös mõeldud asfaltkattega teid ning katteta teede all siirdekattenditega teid (kiilutud killustikust, kruusast ehitatud katend).

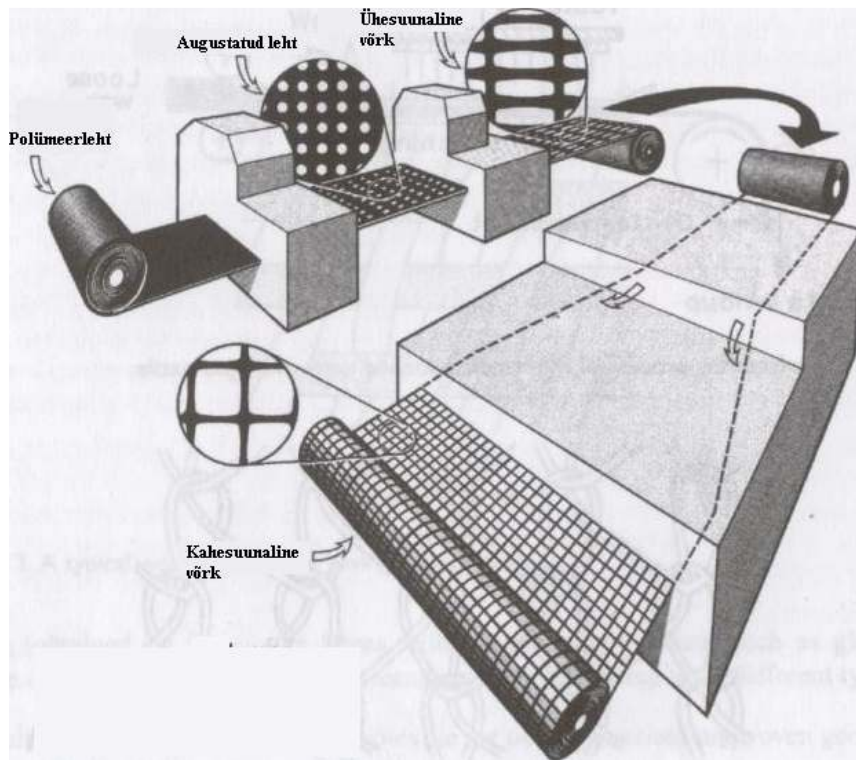
¹ Vaata konstruktsiooni joonist lisa 3

2. TOOTMINE

Kuna töö käsitleb peamiselt jäikaid augustatud ja tõmmatud (punched and drawn) geovõrke, siis on toodud välja vaid selle tootmis põhimõtted.

Augustatud ja tõmmatud geovõrke toodetakse polümeermaterjalist kahe-kolmeetapilise protsessi käigus. Kõigepealt söödetakse polümeerleht (mitu millimeetrit paks leht rullmaterjalina) masinasse, mis torkab teatud intervalliga materjalisse auke. Sellele järgneb augustatud lehe kuumutamine ja venitamine/tõmbamine piki masinat (tehnilistes spetsifikatsioonides antakse eraldi tugevused masinasuunalisele suunale ja sellele risti – lühenditena vastavalt MD ja TD/XMD). Selliselt tekivad polümeerlehe aukudest võrgu avad. Lisaks, muutmaks avade algset geometriat, tõmbeprotsess suunab algselt juhuslikult asetsevad polümeeri makromolekulid tõmbesuunda, millest tuleneb geovõrgu suurem tugevus võrreldes ristisuunaga. Orientatsiooniaste (makromolekulide piki kiu telge orienteerituse mõõt) varieerub kogu võrgu pikkuse ulatuses; siiski, üldine efekt sellest on täiustus tõmbetugevuse ja –jäikuse osas. Protsess võidakse seisata antud kohas, tulemuseks saadakse ühes suunas töötav võrk. Võrk võidakse suunata edasi kolmandasse tootmisfaasi, kus soojalt tõmmatakse teda põiksuunas ning saadakse kahesuunaline geovõrk (joonis 1). [13: 20]

Kuigi temperatuur protsessi käigus on kõrgem ümbritsevast, on tegemist praktiliselt külmalt tõmbamisega, nimelt on see märgatavalt madalam kui polümeeri sulamistemperatuur. Tuleb veel märkida, et nii toodetud võrgu ribad on palju jäigemad näiteks geotekstiili kiududest, samuti muude tootmistehnoloogiatega toodetud võrkude kiududest.



Joonis 1. Augustatud ja tõmmatud geovõrgu lihtsustatud tootmisskeem [13]

3. KASUTUSVALDKONNAD JA TÖÖPÕHIMÕTTED

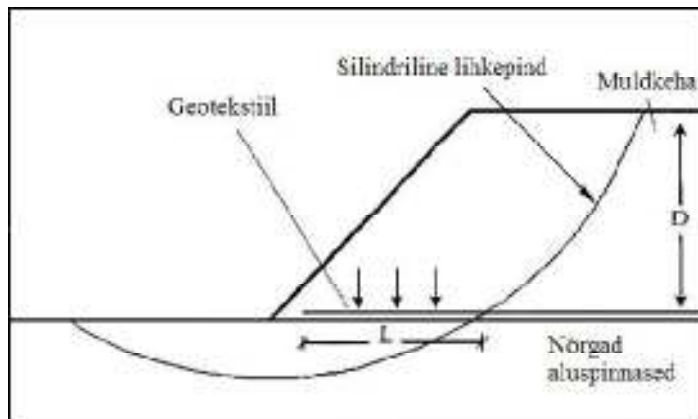
Geovõrkude peamine funktsioon on tugevdamine, pinnaste omaduste parandamine ehk stabiliseerimine. Kõrvalfunktsiooniks on eraldamine, eriti kui pinnas on väga jämedateraline.

Jäiga geovõrgu toimivus sõltub peamiselt tema jäikusest, tõmbemoodulist ja geomeetriast – omadustest, mis määravad geovõrgu võime lukustada endasse pinnaseosakesi (joonis 2). Seeläbi suudab ta vastu võtta konstruktsiooni enda koormusest tingitud või eksploateerimisel tekkivaid tõmbe- ja nihkepingeid, mis kantakse pinnastelt üle geovõrgule läbi tekkivate hõrdejõudude ning lukustussüsteemi. Kasutades pinnasetöodes armeerimist, on võimalik vältida lisakandekihtide ehitamist ning saada majanduslikku kasu minimiseerides kandvate kihtide paksust või suurendada konstruktsioonide eluiga.



Joonis 2. Täitematerjalide lukustumine geovõrgus

Mõningatel juhtudel muldkeha armeerimist saab vaadelda kui tavalist nõlvapüsivuse juhtumit, kus koormuste korral, mis ületavad aluspinnaste kandevõime, toimub konstruktsiooni deformeerumine mööda silindrilist lihkepinda. Sellisel juhul on geosünteedi peamiseks ülesandeks võtta vastu koormustest tingitud nihkepinged vältimaks deformatsioonide teket (joonis 3).



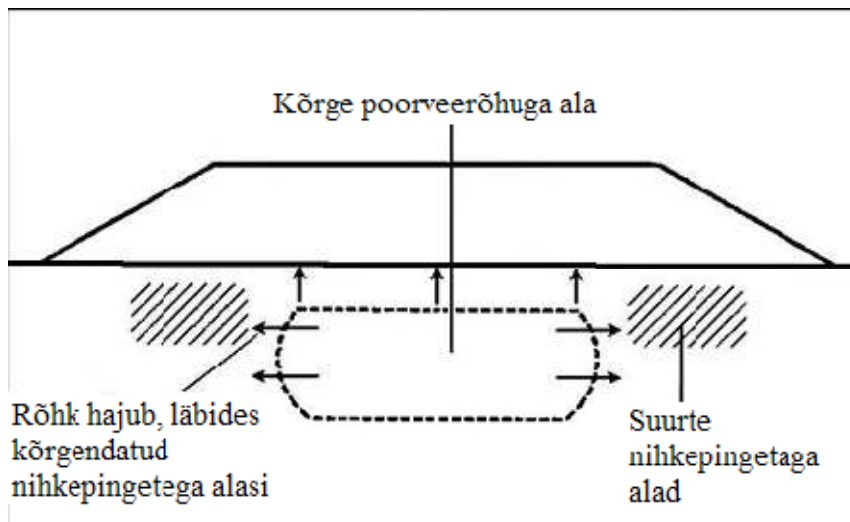
Joonis 3. Võimalik mulde purunemine [2]

Pinnaste tugevdamise funktsiooni täitva sobiva geovõrgu valimisel ei lähtuta ainult tema vastupidamisest paigalduspingetele, vaid tuleb teha põhjalikud aluspinnase uuringud ning valida konkreesse situatsiooni sobiv geovõrk.

Projekteerimise algstaadiumis tuleb uurida aluspinnaste omadusi ja teha järeldused, kas ehitatav muldkeha:

- vajab permanentset tugevdamist, kuna nõrgad aluspinnased ei suuda kunagi hakata vastu võtma koormustest tingitud pingeid;
- geosünteediga tugevdamine on ajutine, kuni aluspinnased saavutavad mulde koormusest tingitud tihenemisel ise piisava tugevuse tagamaks muldkeha stabiilsuse.

Enamlevinud on olukord, kus pinnased vajavad lisatugevdamist, kuna muldkeha rajamisel aluspinnase ülekoormamise tulemusena kasvanud poorivee rõhu tõttu on aluspinnase kandevõime märkimisväärselt vähenenud. Sellises olukorras on geosünteedi ülesandeks vastu võtta tekkivaid pingeid senikaua, kuni poorivee rõhk normaliseerub ja pinnas saab tagasi oma tugevusomadused. Projekteerimisel tuleb arvestada asjaoluga, et poorivee rõhk väljub muldkeha all olevatest pinnastest külgede kaudu ning seega läbib ta mulde servade all olevaid väga suurte nihkepingetega alasid (joonis 4), mille tulemusel liiga nõrkade geosünteedide kasutamine võib viia kogu mulde (ebaühtlase) vajumiseni. Armeerimisfunktsiooni täitval geosünteedil peab olema suur tõmbetugevus (EN ISO 10319) suhteliselt väikese venivuse juures vältimaks konstruktsiooni hilisemat kujumuutust, aga ka head roomavus- (EN ISO 13431) ning vastupidavusnäitajad (ENV ISO 12960, ENV ISO 13438, ENV 12447, EN 12225) seoses kasutatava geosünteedi pikaajalise tööeaga.



Joonis 4. Poorirõhust tekkiv võimalik purunemisoht [2]

Eeltoodud omaduste loetelu ja praktiliste näidete põhjal võib järeldada, et armeerimiseks ei sobi mittekoatud geotekstiilid oma suurte venivusomaduste tõttu. Antud funktsiooni juures leiavad kasutust kootud geotekstiilid, sest neil on väikesed roomavus- ja venivusnäitajad. Üldjuhul aga kasutatakse kootud geotekstiilide kalli hinna tõttu geovõrke eraldi või koos mittekoatud geotekstiilidega. Sellises liitkonstruktsioonis täidavad geosünteedid lisaks armeerimisele ka filtreerimise ja eraldamise funktsioone. [2]

3.1. Katteta teed

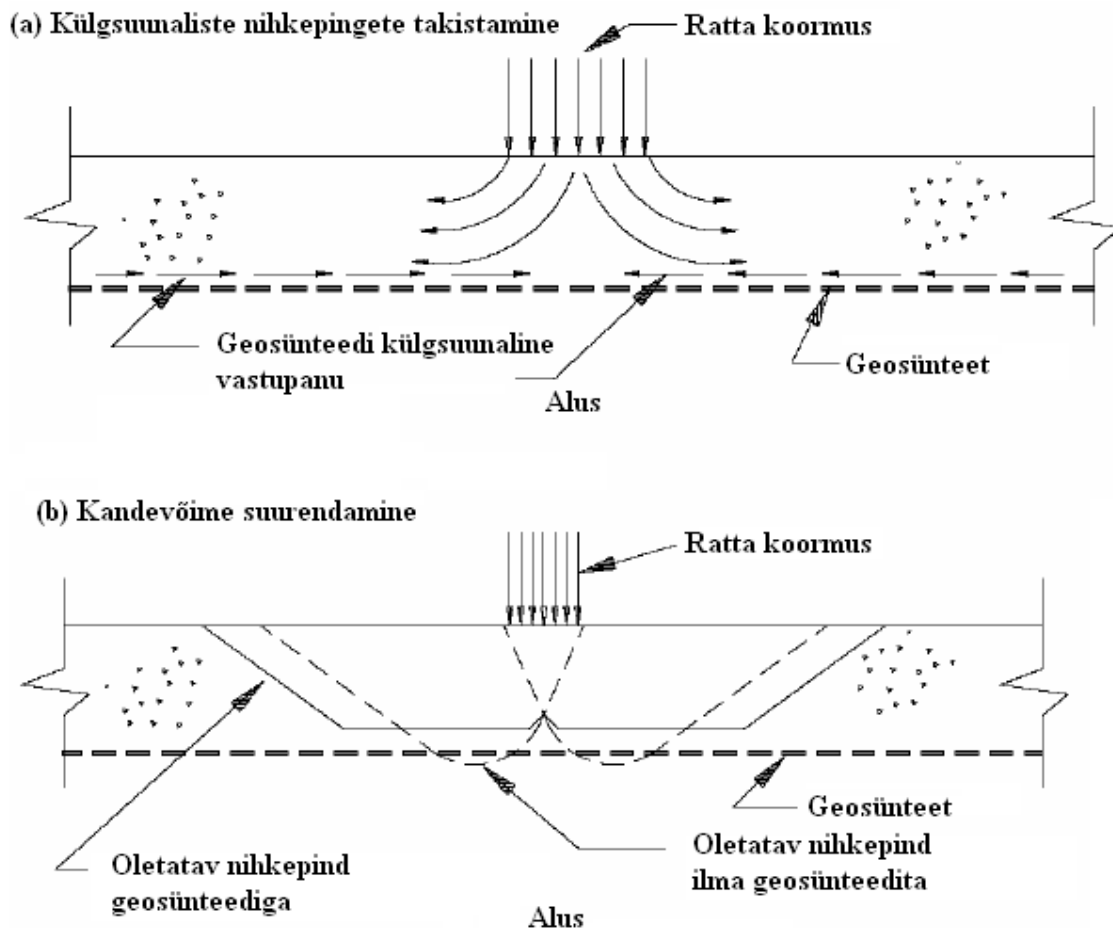
Katteta teede geovõrkude ja -tekstiilide armeerimisvõime põhineb kolmel mehanismil:

- kihtidevaheliste külgsuunaliste nihkepingete vähendamine läbi hõõrde või lukustamise (joonis 5a);
- konstruktsiooni kandevõime suurendamine sundides silindrilist lihkepinda liikuma suuremat raadiust mööda (joonis 5b);
- membraanefektil (joonis 5c).

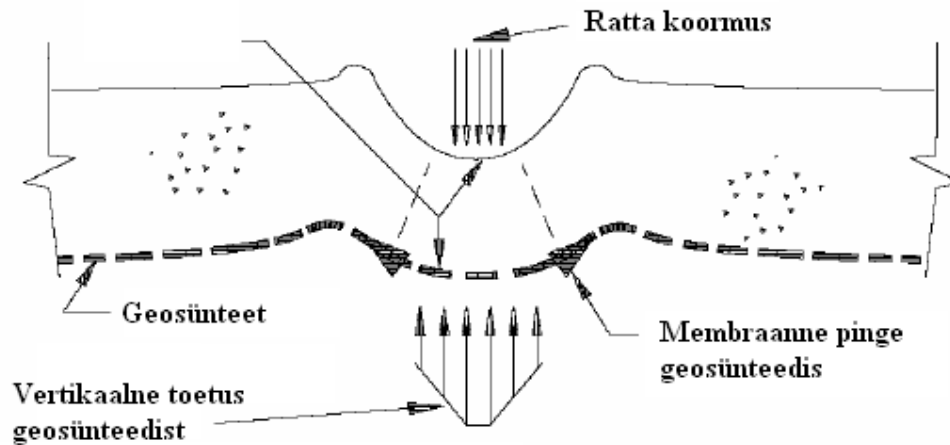
Koormates kandvat kihti üritab materjal liikuda vertikaalsuunas, kui seda ei takista geosünteeet või aluspinnas. Pehme aluspinnas pakub vaid vähest tuge ning kandva kihi materjal hakkab liikuma kõrvale tekitades roopad nii tee pinnale kui ka alusele (joonised 6 ja 11). Võrk, millel on head

lukustusomadused või tekstiil, mille pinnal tekib hea hõõrdemoment, suudavad takistada sellist liikumist. Teise juhtumi puhul lihkepind siirdub tugevama materjali pinda ja seeläbi kasvab tugevus.

Kolmandas mehanismis membraanefekt toimib kahel moel. Selle juures ratta koormus peab olema piisavalt suur tekitamiseks plastseid deformatsioone ja roopaid alusesse. Kui geosünteet on piisava tõmbetugevusega, rakenduvad temas tõmbepinged ja tema horisontaalsuunaline komponent võtab vastu osa ratta koormast. Üldiselt geosünteet ei saa toimida venimata - membraanefekti tekkeks on vaja tavaliselt üle 100 mm roopa teke. Seetõttu praegu projekteeritakse selle efekti peale vaid ajutiselt kasutatavad teed, või kasutatakse seda ära püsikattega teede puhul esimese kihi ehituse ajal.



(c) Membraanefekt



Joonis 5. Geovõrgu toimivus katteta teede puhul [16]

Kuna antud omadus on tegelikult väga tähtis ja paljud eksperdid peavad seda kõige olulisemaks teiste toimimisviiside seast, on asja üritatud parandada augustatud ja tõmmatud viisil valmistatud jäikade võrkude kasutuselevõttuga. Tegelikult antud omaduse juures avalduvadki väga hästi nende eelised.

Tõmmatud geovõrk on juba tehases eelpingestatud valmistamise käigus ning see viib efektiivse pingete ülekandmiseni mööda võrgu ribisid, ilma et oleks vaja märkimisväärseid venimisi ja sellest tulenevaid vajumeid. Antud omadust enam küll ei saa nimetada päris membraanefektiks, kuna see ei mõiste ei kirjelda täpselt kontstuktsioonis toimuvaid protsesse. Pigem on ta midagi membraanefekti ja lukustussüsteemi vahepealset, kuna esimene mõiste kirjeldab tõmbepingete koondumist, teine nihkepingete vähendamist. Jäigad võrgud ühendavad järelikult neid mõlemaid omadusi.

3.2. Katttega teed

Ka katttega teede armeerimine põhineb peamiselt külgsuunaliste nihete takistamisel kandvas kihis. See ei ole siiski ainus mõjutegur, ülejäänud neli komponenti on täheldatud olevat:

- geovõrk (või ka tekstiil) takistab erinevate omadustega pinnaste segunemise;

- lisab kandvale või jagavale kihile tuge ja läbi selle suureneb konstruktsiooni tugevus geovõrgu vahetus läheduses; geovõrk ei lase kihtide materjalidel liikuda vertikaalsuunas;
- parandab horisontaalsuunalise pinge jagunemist aluspinnale;
- vähendab nihkepingeid aluspinnases (geovõrk suurendab koormusjaotusnurka ning aluspinnasele tulevad väiksemad pinged). [16: 19]

Armeerimismehanism tuleneb geosünteedi ja materjali nihkedeformatsioonidest. Tee pinda mõjutavad rattakoormused põhjustavad konstruktsioonis materjalide horisontaalseid liikumisi. Koormuse alla tekib horisontaalseid nihkeid materjalide liikudes koormusest allapoole ja külgedele. Kandva kihi horisontaalsuunaline nihkumine võimaldab vertikaalsuunalise kujumuutuse ja viib seeläbi roopa tekkeni rataste liikumisalal (joonis 6).

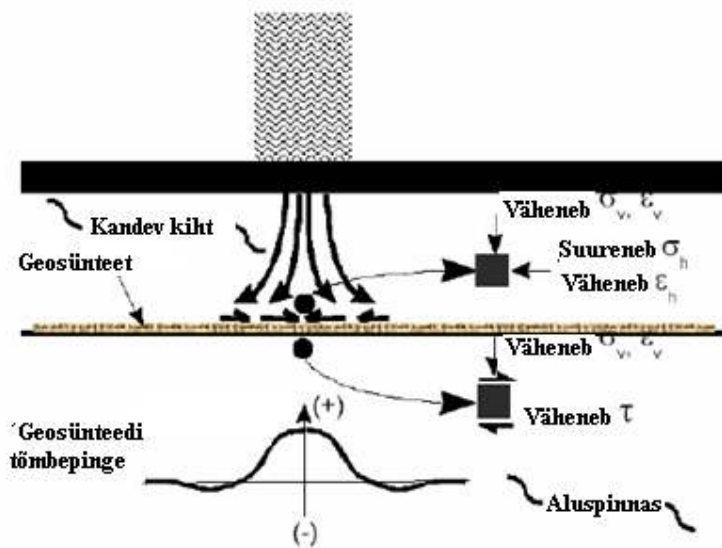


Joonis 6. Osaliselt aluse nihkumisest tekkinud roopad tee pinnas

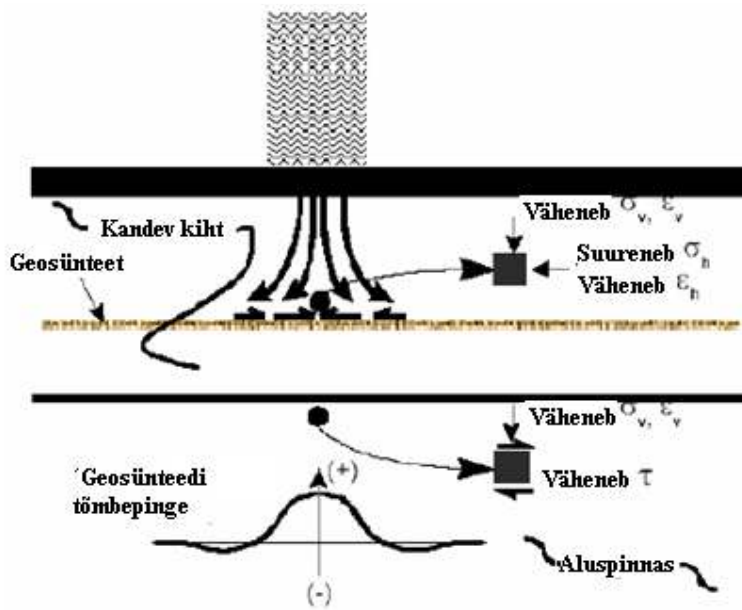
Geosünteed kandva kihi põhjas võimaldab põikjõu tekke jämedateralise materjali ja geosünteedi vahel, kui jagav kiht hakkab vajuma külgedele. Nihkepinged kandvast kihist suunatakse geosünteedile, mille tõttu viimases tekib pinge. Näiteks geovõrgu jäikus vähendab oluliselt põikjõududest tulenevate nihkepingete tekkimist kandvas kihis võrgu läheduses (suuremosa pingetest killustikus suunatakse võrgu tasapinda). Mida väiksemad on horisontaalsed nihkedeformatsioonid, seda väiksemad vertikaalsed moonDED tekivad tee pinda (roobas).

Jämedateralise materjali ja geosünteedi vahele tekkinud pinge lisab kandvale kihile põiksuunalist tuge, läbi selle suureneb kandva kihi jäikus. Geovõrgu abil saadavast suuremast jäikusest tulenevalt on ka deformatsioonid kandvas kihis väiksemad ning läbi selle saaks teoreetiliselt vähendada asfaldi paksust. Kandva kihi all olev geovõrk (või ka tekstiil) muudab ka jagava kihi ning aluspinna koormus- ja moonde situatsioone. Konstruktsioonis, kus nõrk aluspinnas on jagava ja kandva kihi all, jaguneb koormusest tulenev pinge aluspinnal suuremale alale, mille tõttu kujumuutused on väiksemad. Geovõrgu armeeringust tulenevat koormusjaotusnurga suurenemist on selgitatud hiljem.

Geosünteeetiliste tugevdajate mõjutegur tuleneb veel aluspinnase nihkepingete vähenemisest. Teoreetiliselt võttes kandvast kihist aluspinnasele ülekantav nihkedeformatsioon väheneb, kui osa nihkepingetest läheb üle geosünteedi tõmbejõududeks. Väiksemad nihkepinged koos väiksemate vertikaalsuunaliste moonetega tekitavad paremad koormustingimused ja väiksemad roopad ehk väiksemad moonded pindades.



Joonis 7. Geosünteeet kandva kihi all, aluspinna peal [16]



Joonis 8. Geosünteed kandva kihi vahel [16]

Joonistelt 7 ja 8 on näha pingete jaotus konstruktsioonis ja sellest tulenevad deformatsioonid ning pingete ülekanded. Sümbolid joonistel on järgmised:

σ_v ja σ_h – vastavalt pingete vertikaal- ja horisontaalkomponendid;

ϵ_v ja ϵ_h – vastavalt vertikaal- ja horisontaalsuunaline deformatsioon;

τ – nihkepinge pinnases.

Kasutades geosünteedi, konstruktsioonis pinged ja deformatsioonid vähenevad, seavastu geosünteedi vahetus ümbruses pinged suurenevad. Järeldus sellest on, et geosünteed koondab pinged endasse ja enda vahetusse lähedusse.

3.3. Geosünteedide paiknemine konstruktsioonis

Geosünteedilisi tugevdajate mõju on leitud olevat eriti märkimisväärne just teekonstruktsioonide eluea pikendamisel. Kirjanduses on esitatud kümneid eelkõige geovõrkudega ja –tekstiilidega seotuid katseid, mis näitavad nende kasu just roopasügavuse vähenemises ja seeläbi tee eluea pikendamises ning kihipaksuste vähenemises, aga küsimus jääb, kus oleks kõige õigem paiknemiskoht.

Mitmetes uuringutes geosünteesiliste tugevdajatega saadud kasu on leitud olevat parim, kui toode on paigaldatud 200 – 300 mm paksu kandva kihi alla. Suuremate kihipaksuste korral oleks ideaalne paigutuskoht kihi keskel. Õhukeste kihipaksuste korral (<200 mm) geovõrkude vähene separeerimisvõime võib tekitada probleeme. Sellistel juhtudel tekstiilid toimivad paremini, eriti kui aluspinnase tugevus on alla 3 CBRi² (E-moodul alla 30 Mpa). Tugevdajatest oli suurim kasu kuni 8 CBRini (E = 80 Mpa).

Üldiselt võttes geosünteesilistest tugevdajatest saadav kasu väheneb vastavalt aluspinna kandevõime suurenemisele. Pehmetel alustel (E < 30 Mpa) geosünteesidest saadav kasu on mitmekesisem, alates aluspinna ehitusaegse ärrituse vähenemisest kuni kihipaksuste vähenemise ja teenindustaseme tõusmiseni. Keskmise kandevõimega aluspinnaste (30 < E < 80 Mpa) puhul peamine kasu on kandva kihi paksuse vähenemine ning eluea pikenedamine. Tugevatele alustele (E > 80 Mpa) rajatute teede puhul selliseid kasutegureid saadakse vastavalt objektile, kuid see on pigem erand kui reegel. [16: 16]

3.4. Mis vahe on jäikadel ja pehmetel võrkudel?

Nagu hiljem näha, kõikidest arvutustest käivad läbi mõisted nagu lukustusmehhanism geosünteesi ja kandva kihi materjali vahel ning geosünteesi tasapinnaline tugevus, sealhulgas ava ja sõlme stabiilsus ning viimase tugevus. Pehmetel võrkudel neid omadusi ei ole. Samuti tuleb suur vahe sisse tööpõhimõttes – jäigad võrgud on teatud töötama lukustusüsteemile, mis hoiab materjaliosakesi enda küljes ega lase neid külgedele vajuda. Läbi selle suureneb kandva kihi jäikus ja koormusjaotusnurk ehk aluspinnale mõjuvad väiksemad koormused. Pehmed võrgud töötavad see-eest membraanefekti põhimõttel ehk nad vajavad juba ainuüksi tööle hakkamiseks suuremaid materjali nihkumisi ja pinnase vajumisi, millest tuleneb roopa teke. Pehmed võrgud peavad kõigepealt pingestuma enne tööle hakkamist. Kui arvestada veel seda, et polümeerid venivad, kujuneb roobas oluliselt suuremaks kui jäikade võrkude puhul. Samuti pole jõudude ülekandmine võrgu tasapinda lukustuse puudumise või selle vähesuse tõttu nii efektiivne. Kuna geovõrkude valmistusmaterjaliks on polümeerid, mis

² CBRi mõistet on selgitatud lisa 2

hoolimata kõigest venivad, siis ka jäigad geovõrgud vajavad tööle hakkamiseks nõningaid nihkumisi pinnases, kuid mitte nii ulatuslikke võrreldes pehmete geovõrkudega.

Säilitamiseks seda pinget pehmes geovõrgus, mis tekib deformeerumisel membraanefekti puhul, tuleb autodel sõita pidevalt samas jäljes ehk ideaalne on kanaliseeritud liiklus, kõrvalekaldumine tekitab juurde uusi roopaid ja pehme geovõrk enam ei toimi. Lukustussüsteem töötab kogu konstruktsiooni ulatuses tinglikult öeldes võrdselt.

Suur vahe tuleb sisse ka ehitamise käigus. Nagu eelnevalt mainitud, tuleb pehmete võrkude tööle hakkamiseks neid pingestada ja nad peavad jääma pingesse. See nõuab seda, et nad tuleb tee servadesse ankurdata püsivaks paigal pideva pinge all. Seevastu jäigad võrgud läbi oma tugevate ühendussõlmede suudavad püsida paigal ja pinge all ainuüksi lukustussüsteemi toel. Sellest tulenevalt, et saada soovitud tulemust, tuleb pehmete võrkude paigaldamiseks näha rohkem vaeva kui jäikade võrkude puhul. Viimase võib lihtsalt laotada alusele ilma servadesse ankurdamata. Kuna membraanefekti põhimõttel töötavates konstruktsioonides tekivad suuremad roopad, siis nõuab suuremaid kulutusi ka nende roobaste parandamine ja täitmine.

4. OMADUSED

Tagamaks häid ja usaldusväärseid tulemusi konstruktsioonis, peab geovõrkudel olema teatud omadused. Läbi aastate toimunud arendustöö on välja kujunenud teatud omadused, mida nõutakse, katsetatakse ja esitatakse spetsifikatsioonides. Näiteks Tenax on seadnud oma võrkudele järgmised nõuded: [12]

- tugevduselement peab olema ühtne ja jäik, valmistatud polüpropüleenist. Ühenduskohad ribide vahel peavad olema ühtsed tervikud. Elemendid, mis peavad vastu võtma tõmbejõude, ei tohi mitte mingil juhul olla ühendatud kudumise, sidumise või punumise teel;
- varutegur paigaldamisaegsetele vigastustele ei tohiks olla suurem kui 1,05 testituna terava koonusega. Varuteguritest tuleb täpsemalt juttu eraldi peatükis;
- tugevduselement peab olema inertne kõikidele looduslikus pinnases leiduvatele keemilistele ühenditele. Ta ei tohi alluda hüdroolüüsile ja peab olema resistentne vees lahustuvatele sooladele, hapetele ja alustele, ei tohi olla biolagunev. Materjalis peab olema piisav kogus tahma võtmaks vastu UV-kiirguse kahjulikku toimet. Minimaalne varutegur vastupidavusele/vananemisele PP võrgu puhul on 1,0;
- minimaalsed varutegurid polüestrist (PET) valmistatud geovõrkudele on: 1,6 pinnaste puhul, mille pH jääb vahemikku $5 < \text{pH} < 8$ ja 2,0 pH väärtuste juures $3 \leq \text{pH} \leq 5$ ning $8 \leq \text{pH} \leq 9$. PET võrke ei tohi mingil juhul kasutada lubja või tsemendiga stabiliseeritud ja soolastes pinnastes ning kohtades, kus $\text{pH} < 3$ ning $\text{pH} > 9$.

Nõuded on lisaks valmistusmaterjalidele veel füüsilistele omadustele. Mõned arvutusmeetodid on spetsiaalselt välja töötatud teatud omaduste peale. Nendest tuleb juttu hiljem.

4.1. Toormematerjalid ja nendest tulenevad omadused

Põhiliseks geovõrkude tootmismaterjaliks on polümeerid, peamiselt polüetüleen (PE), polüpropüleen (PP) ja polüester (PET). Nagu juba eelpool mainitud, valmistatakse jäiksid võrke polüetüleenist ja polüpropüleenist ning pehmeid polüestrist. Vähesel määral on ka võimalikud teised materjalid, kuid need pole praktiliselt levinud. [13]

Valides geovõrku, tuleb kindlasti arvestada kohalike oludega, kuhu teda paigaldatakse. Erinevatel materjalidel on erinevad omadused ning neid mõjutavad erinevad keskkonnategurid – nii füüsilised kui keemilised. Geovõrgu füüsilisi omadusi mõjutavad tegurid on:

- otsene päikesevalgus, ultraviolettkiirgus;
- kuumus – eriti asfaldiga kokkupuutes;
- madal temperatuur – väga madalad temperatuurid muudavad polümeerid hapraks;
- pH-tase – vette või vett sisaldavasse keskkonda paigaldatud polüestrid lagunevad kõrge ja polüamiidid madala pH-taseme mõjul;
- tugevalt keemiline keskkond.

Lisandeid kasutades saab mõjutada materjalide füüsilisi ja keemilisi omadusi. Enamasti on kasutusel olevad polümeerid töödeldud stabiliseerivate, oksüdeerimis- ja UV-kiirgusvastaste lisanditega, mis segatakse polümeeride sulatusstaadiumis. Tehnilistes spetsifikatsioonides on kirjas kui mõjutasaldis toode on erinevatele mõjuteguritele. Näiteks tuuakse ära, et tootel on 95% kindlus UV-kiirgusele ja ilmastiku mõjudele.

Igal erineval polümeeril on oma konkreetsed omadused, mida saab kasutada konstruktsioonile esitatavate vastavate tehniliste nõuete täitmiseks (tabel 1 ja 2).

Tabel 1.

Polümeeride omadused

Polümeer	Roomamiskindlus	Keemiline vastupidavus	Stabiilsus ultraviolettkiirgusele
Polüpropüleen (PP)	Keskmine	Väga hea	Hea
Polüetüleen (PE)	Keskmine	Väga hea	Hea
Polüester (PET)	Kõrge	Hea	Keskmine

Tabel 2.

Polümeeride füüsilised omadused

Polümeer	Erikaal	Sulamis- temperatuur °C	Tõmbetugevus 20°C (MN/m ²)	Elastsusmoodul (MN/m ²)	Venivusaste purunemisel %
Polüpropüleen (PP)	0,90 – 0,91	165	400 – 600	2000 – 5000	10 – 40
Polüester (PET)	1,22 – 1,38	260	800 – 1200	12000 – 18000	8 -15
Polüetüleen (PE)	0,91 – 0,96	130	80 – 600	200 – 6000	10 - 80

Vähemalt baasteadmiste omamine polümeeride omadustest ning võrkude tootmisest on olulisel kohal õige toote valimisel, kuna peamiselt nendest olenevad võrgu omadused (tugevus, jäikus, hind, kättesaadavus jne). Kõik vajalikud omadused tehakse kindlaks testimisel, kas laboratoorsel teel või ehitusplatsil kohapeal.

4.2. Geosünteedide füüsilised omadused

Väga olulised omadused pinnaste tugevdamiseks on **geosünteedi – pinnase kokkupuute karakteristikud** (hõõrde- ja lukustuskarakteristikud). Hõõre ja lukustus peavad olema piisavad takistamiseks pinnase libisemise ja geovõrgu välja tõmbamise konstruktsioonist temale rakendatud tõmbejõudude tõttu. Seetõttu on see omaduse võtmetähtsusega ehitamiseks konstruktsioone, kus on vaja hoida pinnaseid/ehitusmaterjali kindlalt paigal ja mitte lasta neil libiseda (näiteks ehitades tee üle potentsiaalsete tühimike või nõrkadele alustele, kus võivad tekkida väga suured roopad ja seeläbi muuta tee läbimatuks). Seetõttu on tähtis õigesti määrata ka ülekatte suurus.

Roome on ajas kasvav akumulatiivne moone/pikenemine geovõrgus koormuse all. Olenevalt polümeeri tüübist ja temperatuurist, võib roome olla märgatav juba 20% maksimaalsest tõmbetugevusest. Joonis 9 näitab moonde ja aja vahelist seost erinevate polümeeride põhjal. Nii maksimaalne moone kui ka tema kasvamise kiirus erinevad suuresti. Roome on tähtis faktor nii projekteerimise kui ka toimimise juures, eriti mullete ehitamine üle nõrkade pinnaste, materjali armeerimise, tugiseinte ehituse jne. juures. Kõikides nendes kasutusvaldkondades geovõrgult

oodatakse vastupidamist kõrgetele tõmbejõududele pika ajaperioodi jooksul – tavaliselt üle 75 aasta. Suuremate koormuste juures roome võib viia pingepurunemiseni. Mida suurem koormus, seda lühiksem aeg purunemiseni. Sellisel juhul projekteeritud koormus ise limiteerib geovõrgu eluea. Õige arusaam roomest aitab projekteerijal valida lubatava koormuse suurust. Projekteerimisel on reeglits, et roomet puudutavad andmed ei tohi olla vaid hinnangulised. Kaks lähenemist hindamaks lubatud koormust, on esitatud järgmiselt:

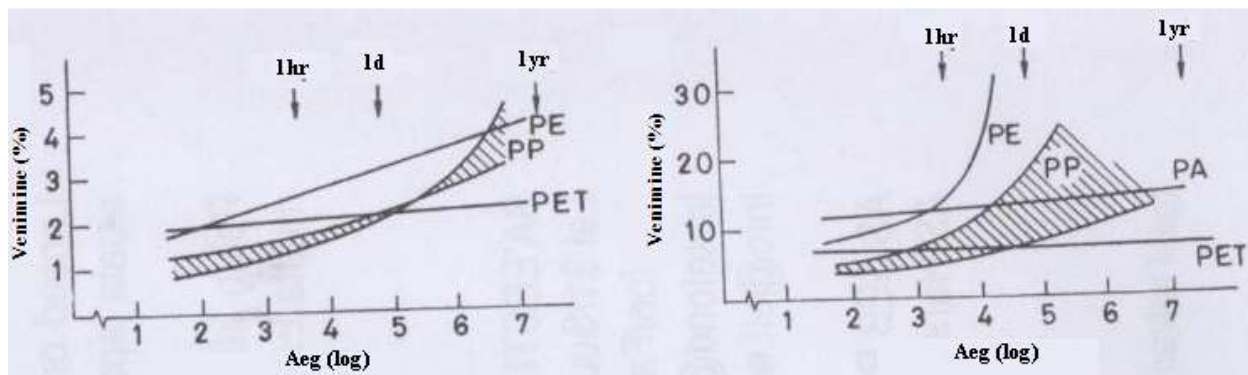
- lubatud koormus põhinedes limiteeritud roome suurusele – nõuab põhjalikke analüüse, roome suurus vs aeg erinevate koormuste all;
- lubatud koormus kasutades varutegureid – geovõrgu tugevust vähendatakse varuteguri võrra vastavalt polümeeri tüübile. Varuteguri suurused on antud tabelis 3. Meetod ei ole tehniliselt kõige täpsem, kuid mõnikord on see ainus võimalus projekteerijale.

Tabel 3.

Vastupidavus roomele

Polümeer	Varutegur roomele
Polüpropüleen (PP)	4.0
Polüester (PET)	2.0
Polüetüleen (PE)	4.0

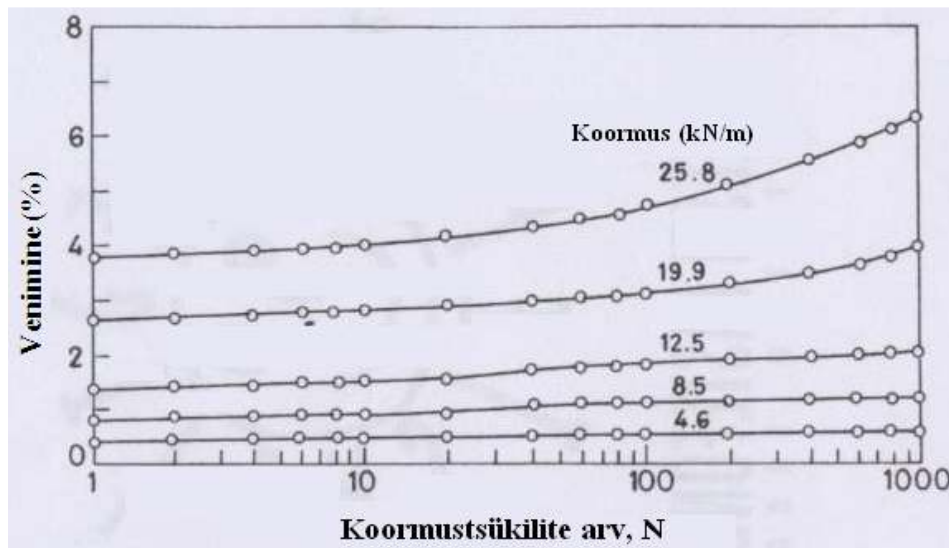
Roomet minimeeritakse eelpingestamisega, näiteks Tensar ja Tenax toodavad oma võrke sellise tehnoloogiaga (augustatud ja tõmmatud võrk). Tuleb veel märkida, et roome geovõrgus väheneb pinnases kuna koormuse kandumine pinnaselt üle geovõrgu suurendab märgatavalt hõõrdetakistust geovõrgu ja pinnase vahel. Seetõttu ei saa alati lähtuda vaid laboris tehtud testidele vaid igal tootjal on olemas andmed ka looduses tehtud katsetustest.



Joonis 9. Roometestid erinevate polümeeri puhul. Vasakpoolne joonis on roome 20% maksimaalsest lubatud koormusest juures, parempoolne 60%

Mõningatel juhtudel pinnase tugevuse suurenemine on seotud geovõrgu pinge vähenemisega ajas. Näiteks sellise toime kohta oleks mulde toetus ehitatuna üle pehme pinnase. Pinge vähenemise nähtust konstantsete jõudude juures ajas nimetatakse **pingerelaksiooniks**, mis on lähedalt seotud roomega.

Jooniselt 10 on näha geovõrgu käitumist dünaamilise koormuse all läbi aja. Kahjuks pole teada, mis tootega on tegemist, aga ligikaudse ja üldistava pildi on võimalik saada. Roome ja dünaamilise koormuse vaheline seos on eriti tähtis kattega ja katteta teedel, tugiseintes jne, ehk kohtades, kuhu mõjub liikluskoormus.



Joonis 10. Katsetatud geovõrgu käitumine koormamise all

Abrasioon geovõrgu puhul tähendab tema pinna kulumist läbi hõõrdumise ja seetõttu tugevuse vähendamist. Eriti tuleb see välja teede ja raudteede puhul, dünaamilise koormuse all, mis võib viia mehaanilise kahjustamiseni ja toime kaotamiseni.

Vastupidavus geovõrgu puhul tähendab võimet säilitada omadused kohapealsetes keskkonnatingimustes või teistes mõjurites projekteeritud eluea jooksul. Omadus on tihedalt seotud võrgu valmistusmaterjaliga. Aja möödudes polümeeri mikrostruktuuris ja võrgu makrostruktuuris toimuvad muutused. Vastupidavust saab hinnata objektil visuaalselt või läbi mikroskoobi andmaks kvalitatiivset hinnangut, näiteks muutused värvis, vigastused kiududes (keemilise või mikrobioloogilise ründe tulem, pinna vananemine UV-kiirguse toimele jne). Materjali analüüs annab

insenerile vajalikku informatsiooni võimalikest omaduste/vastupidavuse muutustest ja nii saab vajadusel suurendada varutegurit arvutustes saavutamaks kindla vastupidamise kogu projekteeritud eluea jooksul.

Vastupidamise hindamine käib järgmiste punktide alusel:

- oluliste keskkonnategurite loetelu;
- võimalikud lagunemise ilmingud seoses geovõrgu ja keskkonna vahel;
- võrgu omaduste hindamise muutumine ajas;
- varutegurite suuruse määramine kindlustamaks konstruktsiooni püsimise projekteeritud eluea lõpuni.

Tuleb meeles pidada, et geovõrgu vastupidavuse määravad tema struktuur, kasutatud polümeer, tootmisviis, kasutuskoha keskkonnaolud, ladustamise ja paigaldamise tingimused ning koormus, mida võrk peab vastu võtma.

Ehitaja seisukohalt vastupidavus tähendab pigem seda, kuidas toode elab üle paigaldusaegse aja. Materjali mõjutavad erinevad mehaanilised vigastused (abrasioon, augud, lõikevigastused), mis võivad tekkida paigaldamise, täitematerjaliga katmise ning tihendamise käigus. Mõningatel juhtudel paigaldusaegsed pinged võivad olla tõsisemad kui tegelikud projekteeritud jõud. Reeglina talvisel ajal ehitades on võrgud vastuvõtlikumad mehaanilistele vigastustele külma tõttu tekkinud rabeduse pärast. Samuti tõsiste vigastuste oht tekib kasutades jämedateralisi ja teravate äärtega täitematerjale ning tihendades väga õhukesi kihte võrgu peal (üldiselt geovõrgu peale tuleb panna vähemalt 10 cm paksune kiht. Õhukese kihina mõeldakse sellelähedast suurust). Sellised vigastused vähendavad võrgu mehaanilist tugevust. Järgides tootjapoolseid paigaldusjuhiseid, on taolised ohud minimaalsed.

Võrkude pikaealisust (nende algmaterjalie polümeere) mõjutab tugevalt UV-kiirgus, temperatuur, niiskus ning pinnase pH-tase. Praktiliselt kõikidele toodetele on lisatud stabiliseerivad ained, mis ei lase polümeeri eelpool nimetatud teguritel mõjutada. UV-kiirguse vastu lisatakse polümeeridele musta pigmenti või tahma. PP-võrke kasutatakse nende hea temperatuuritaluvuse tõttu kohtades, kus temperatuur võib kasvada liiga kõrgeks, näiteks kokkupuutel asfaldiga. Liigniiskus ohustab vaid PETst koosnevaid võrke ning vastupidavust hüdrolüüsi vastu testitakse ISO-13239 järgi. Seetõttu sadamates ja veekogude juures ehitades ei tohi kasutada PET valmistatud võrku.

Üldiselt geosünteedide vastupidavus säilib vähemalt 25 aastat, kui pinnase pH jääb vahemikku 4 – 9 ning temperatuur vähem kui 25°C. Objektipõhiselt tuleks uurida spetsiifilisi keemilisi mõjutusi, kui pinnas on näiteks leeliline, pH > 9 või happeline pH < 4. Uuringud on näidanud, et PP tooted jäävad betooniga kokkupuutes (leeliline keskkond) mõjutamata, seevastu samas kohas võib PET kaotada umbes 50% oma tugevusest juba kahe kuuga.

Mikrobioloogilised mõjutused (elusorganismide poolt toodetavate ensüümide mõju) ei avalda geosünteedidele erilist mõju, kuna need on valmistatud kõrge molekulmassiga polümeeridest (PE, PP, PET). Siiski tuleks olla ettevaatlik materjalide suhtes, mis sisaldavad looduslikku kiudu, kaetud materjalide (coated), geokomposiitide ning toodete suhtes, mille kvaliteet on kaheldav. Antud töös käsitletavat võrgud sellesuhtes ohtlikest materjalidest valmistatud pole.

Keskkonnatoimeline murenemine tõmmatud PET ja PP geovõrke ei ohusta. Poolkristalliline polümeer PE võib olla rohkem aldis murenemisele.

Tabel 4.

Erinevad geovõrkude näitajad

Geovõrgu tüüp	Tõmbetugevus (kN/m)	Venivus max koormuse juures (%)	Ava suurus (mm)	Ühikmass (g/m ²)
Ekstruuderdatud	10 – 200	20 – 30	15 – 150	200 – 1100
Punatud	20 – 400	3 – 20	20 – 50	150 – 1300
Kootud	20 – 250	3 - 20	20 – 50	150 – 1100
Seotud	30 – 200	3 - 15	50 – 150	400 - 800

Geovõrkude peamine funktsioon on tugevdamine ning selleks vajalikud omadused on tugevus, jäikus, geosünteedi-pinnase kokkupuute karakteristikud (hõõrde- ja lukustuskarakteristikud), roome, pingereleksioon, vastupidavus.

4.3. Geosünteedide funktsioonid

Igal geosünteedil on omad peamised funktsioonid, mille järgi otsustatakse missugust liiki kasutatakse, lisaks on kõikidel olemas ka sekundaarfunktsioonid. Näiteks eraldamist sobib teha kõige

paremini geotekstiiliga (tema peamine funktsioon), samas saab teha ka geovõrguga, mis on tema kõrvalfunktsioon. Sama lugu on armeerimisega, mis on jälle võrgu peamine funktsioon.

Iga funktsioon kasutab ühte või rohkem geosünteedi omadusi, näiteks tõmbetugevus või keemiline vastupidavus. Funktsionaalsuse mõistet kasutatakse üldiselt tugevusteguri (factor of safety - FS) valemi juures:

$$FS = \frac{\text{Lubatud funktsionaalne omadus}}{\text{Nõutud funktsionaalne omadus}} \quad (1)$$

Lubatud funktsionaalne omadus võrdub kättesaadava omadusega mõõdetuna katsetuste teel, mida on vähendatud teatud kordajaga suurendamiseks tugevusvaru. Kordajad määratakse igale objektile eraldi vastavalt kohapealsele olukorrale. Seda teeb kas projekteerija tuginedes oma kogemustele, määratakse vastavalt katsetustele või võrreldakse olukorda etteantud juhendite ja soovitustega. Terve protsess, projekteerimine funktsiooni järgi, on üldiselt väga levinud. Kui tugevustegur (FS) on märgatavalt üle ühe, on geovõrk sobiv kasutamiseks, kuna ta kindlustab ehitise stabiilsuse ning nõutud teenindustaseme.

Geovõrkude omadused võivad muutuda ebasoodsas suunas läbi protsesside nagu näiteks vananemine, mehaaniline vigastamine, roome, hüdrolüüs (reaktsioon veega), keemiline ning bioloogiline rünnak, ultravioletvalguse mõju. Kõiki selliseid faktoreid tuleb võtta arvesse geovõrgu valimisel.

Projekteerimisel tuleb arvestada tõmbemoodulit, sest geovõrgu peamiseks tööülesandeks ongi töötada just tõmbele. Igal toodetud geovõrgul on olemas katseanalüüsid ning sellega kaasas pinge-deformatsiooni joongraafik. Põhimõtteliselt on tegemist teguriga, mis kirjeldab geovõrgu ühe ühiku tõmbepinge ja suhtelise deformatsiooni vahelist seost. Tegemist on Young'i mooduli vastega võrreldes teiste materjalidega nagu näiteks betoon, teras, puit. See annab pildi vajalikust deformatsioonist, et saavutada nõutud pinge materjalis.

Joonis 26 kujutab erinevate geosünteedide tugevusparameetreid. On näha, et geovõrkudel on suhteliselt kõrge mõõtmete stabiilsus (ei moondu pinge all) ja kõrge tõmbetugevus ning –moodul juba madala suhtelise deformatsiooni juures. Armeerimiseffekt pinnastes tekib võrkude puhul juba nii madala deformatsiooni korral nagu 2%. Kõrge tõmbemoodul tuleneb valmistusaegselt

eelpingestamisest, mis lisaks tekitab veel homogeenise struktuuri ilma nõrkade kohtadeta ribides ja ühensukohtades (sõlmedes).

4.4. Varutegurid

Geovõrgud on alati kokkupuutes looduslike pinnastega ning keskkonnaalased tingimused võivad vähendada aja möödudes võrkude sooritusvõimet. Nende omadusi võivad muuta ebasoodsas suunas sellised tegurid nagu vananemine, mehaanilised vigastused, roome, hüdrolüüs (reaktsioon veega), keemiline ja bioloogiline rünnak nagu on kirjeldatud eespool. Mõned tegurid rohkem, teised vähem, palju mängib rolli materjal ning valmistusviis.

Kui geovõrku ei katsetata kohapeal olemasolevates tingimustes ja lähtutakse vaid tootjapoolsetest parameetritest, tuleks määrata varutegurite suurus. Valemit 1 tuleb muuta teatud tegurite võrra vastavalt nende ebasoodsatele olukordadele, mis esinevad objekti. Uus valem näeks välja järgmiselt:

$$\text{Lubatud funktsionaalne omadus} = \frac{\text{laboratoorsel teel testitud omadus}}{f_1 \times f_2 \times f_3 \times \dots} \quad (2)$$

kus

$f_1, f_2, f_3 \dots$ - erinevad vähendustegurid saavutamaks sarnasust laboratoorsetel testtulemustel sellele, mis toimub objekti. Need faktorid kirjaldavad allakäiguprotsesse ja on kas võrdsed või suuremad ühest.

Näiteks laboratoorsel teel testitud ja tootja poolt väljastatud geovõrgu tõmbetugevus on reeglina suurim võimalik väärtus, mida tuleb vähendada enne projekteerimise hakkamist. Selleks on järgmine valem:

$$T_{\text{lubatud}} = T_{\text{max}} \left\{ \frac{1}{f_{\text{ID}} \times f_{\text{CR}} \times f_{\text{CD}} \times f_{\text{BD}}} \right\} \quad (3)$$

kus

T_{lubatud} - lubatud tõmbetugevus kasutusel valemis 2;

T_{max} - maksimaalne tõmbetugevus laboratoorsetest testidest;

f_{ID} - vähendustegur paigaldisaegsetest vigastustest (installation damage) – 1.05 – 1.85 geovõrkudele;

f_{C} - vähendustegur roomele (creep reduction) – 1.5 – 3.0 geovõrkudele;

f_{CD} - vähendustegur keemilisele murenemisele (chemical degradation) – 1.0 – 1.6 geovõrkudele;

f_{BD} - vähendustegur bioloogilisele lagunemisele (biological degradation) – 1.0 – 1.2 geovõrkudele.

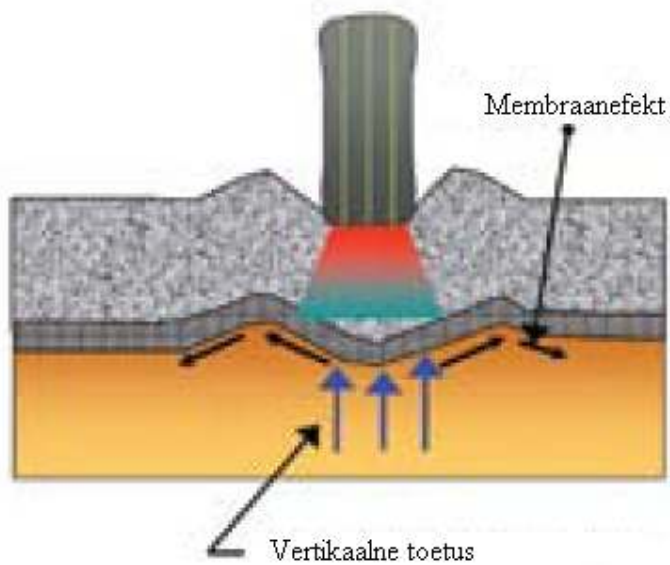
5. GEOVÕRKUDEGA TUGEVDATUD ELASTSETE KATENDITEGA TEEDE PROJEKTEERIMINE

Geosünteeete sisaldavaid struktuure projekteerides tuleb kindlustada selle tugevus, stabiilsus ning teenindustase eluea jooksul. Geovõrkudega projekteerimisel kasutatakse projekteerimist funktsiooni järgi. Enimlevinud elastsete katendite arvutusmeetod on AAHSTO katendiarvutusmeetod kohaldatuna geovõrkudele.

5.1. AAHSTO katendiarvutusmeetod

Ameerikas kattega teede armeerimist käsitlevad projekteerimispõhimõtted annavad võimaluse projekteerijale näha, kui palju kandva kihi paksust on võimalik vähendada või tee ristlõike eluiga pikendada. Osad meetodid põhinevad teatud toodete kasutamisele, osad teatud tüüpi tugevndajatele (kas võrgud, tekstiilid või need koos) ning kolmandad üldisemalt geosünteeetide kasutamisele. Tavaliselt on järgitud AASHTO (American Assosiation of State Highway and Transportation Officials) juhendeid projekteerimiseks ja reeglina just 1993. a. välja antud meetodi järgi. [11]

Meetod põhineb ekvivalenttsel standardsel teljekoormusel (ESAL) tehtud läbikutel. Arvestatakse tekkiva roopa suurusega (joonis 11). Võrreldakse, palju peab tee ristlõiget läbima standardtelgi, et jõutaks välja maksimaalse lubatud roopasügavuseni ilma ja koos geosünteeetidest armeerimismaterjalidega. Projekteerimismeetodid on tavaliselt esitatud diagrammidena või arvutiprogrammidena. Järgnevalt on esitatud AAHSTO meetodi teoreetilised alused ja selle rakendus geovõrkudega.



Joonis 11. Roobas ning geosünteedi toimivus

5.1.1. Projektsuurused

Projekteerimiseks vastavalt AAHSTO juhenditele, on vaja teada erinevaid parameetreid ja projektsuursusi. Järgnevalt on esitatud nende selgitused. [2: 42]

Analüüsiperiood on aeg, mille jooksul võetakse arvesse kõik remondid ja antakse majanduslik hinnang. Analüüsiperiood oli varem tavaliselt 20 aastat, viimasel ajal soovitatakse märksa pikemat (tabel 5).

Tabel 5.

Analüüsiperiood vastavalt tee liigile

Tee	Analüüsiperiood, aastat
Suure liiklusedusega tänavad	30 - 50
Suure liiklusedusega maanteed	20 - 50
Väikese liiklusega kattega teed	15 - 25
Väikese liiklusega kruus- ja killustikteed	10 - 20

Kasutusperiood on aeg ehitamise ja taastamise või taastamiste vahel. Kasutusperioodi pikkuse määrab projekteerija ja see võib olla ehituse (taastamise) hetkest kuni teatud minimaalselt nõutud tarvituskõlblikkuse taseme saabumiseni või kuni tee täieliku amortiseerumiseni.

Kumulatiivne liikluskoormus määratakse 8-tonnisest normkoormusest (ESAL). Kui kasutusperiood on võrdne analüüsiperioodiga, siis on vaja ainult kumulatiivset liikluskoormust. Kui kasutusperiood on analüüsiperioodist lühem, siis on vaja määrata kumulatiivse liikluskoormuse sõltuvus ajast.

Usaldusväarsus (reliability level) on tõenäosus, et liikluskoormus ei ületa vähima tarvituskõlblikkuse taseme arvutamisel eeldatud koormussagedust. Usaldusväarsuse taseme määrab projekteerija kogemuslikult (tabelid 6 ja 7).

Tabel 6.

Soovitav usaldusväarsuse tase

Tee kasutusala	Soovitav usaldusväarsuse tase R	
	linnad	maakohad
Linnadevaheline ja kiirteed	85 - 99,9	80 - 99,9
Peateed	80 - 90	75 - 95
Kogujateed	80 - 95	75 - 95
Kohalikud ja kõrvalteed	50 - 80	50 - 80

Tabel 7.

Usaldusväarsuse ja standardhälbe normi vaheline seos

Usaldusväarsus R	50	60	70	75	80	85	90	91	92
Standardhälbe norm Z_R	0,0	-0,253	-0,524	-0,674	-0,841	-1,037	-1,282	-1,340	-1,405
Usaldusväarsus R	93	94	95	96	97	98	99	99,9	99,99
Standardhälbe norm Z_R	-1,476	-1,555	-1,646	-1,751	-1,881	-2,054	-2,327	-3,09	-3,75

Aluspinnase elastsusmoodul (M_r) muutub aja jooksul sõltuvalt ilmastikuoludest ja arvutuses kasutatakse keskmist. Elastsusmoodul määratakse laboratoorselt või arvutatakse mõõdetud CBR alusel.

Asfaltbetoonkatte elastsusmoodul (E_{AC}) määratakse laboratooriumis, arvutatakse Marshalli stabiilsusest lähtudes või mõõdetakse teel.

Kihtide tegurid (layer coefficients) on katendikihi kandevõimet iseloomustav tegur ja seda kasutatakse katendi struktuurarvu (structural number) määramiseks. Kihtide tegurid määratakse tavaliselt graafikute alusel (graafikud on esitatud lisas).

LCR (Layer Coefficient Ratio) - iga tootja vastavalt laboratoorsetele ja välitestidele on koostanud graafikud, mille järgi määratakse LCR ehk geovõrgu kihitegur. Igale võrgule tehakse katsepolügon, mis võimaldab võrrelda armeeritud ja armeerimata konstruktsioone. Võrreldes neid omavahel, saab määrata kihipaksuse vähenemise ja/või eluea pikenemise. [20]

CBR (California Bearing Ratio) - teedehituses kasutatavate pinnaste tugevusnäitajate iseloomustamiseks kasutatav suurus. CBR on penetratsioonikatse hindamaks materjalide mehaanilist tugevust. Mida tugevam pinnas, seda suurem CBR-arv. Näiteks CBR 3 vastab haritud põllumaa tugevusele; 4,75 niiskele savile ja alates 10 võib olla juba niiske liiv. Kvaliteetne purustatud kivi on üle 80 CBR-i. Väga tinglikult võib öelda, et 1 CBR = 10 Mpa, 2 CBR = 20 Mpa jne; antud seos kehtib vaid kuni 10 CBRini. Tugevamate pinnaste jaoks kasutatakse teist valemit.³

AAHSTO arvutusmeetod põhineb **8t normkoormusel**. Meil kasutatav koormussagedus on muudetud AASHTO kohaseks neljanda astme valemi järgi:

$$N_8 = N_{10} \left(\frac{10}{8} \right)^4 \quad (4)$$

kus

N_8 ja N_{10} - vastavalt 8 ja 10t teljekoormusega koormussagedus.

³ Täpsem selgitus on esitatud lisas

Kumulatiivse koormussageduse (ESAL) arvutamine 15 aastale:

$$\sum_1^{15} N_i = 365N_1 \frac{(q^{15} - 1)}{(q - 1)} \quad (5)$$

kus

N_1 – koormussagedus ehitusaastal;

q – koormussageduse kasvutegur geomeetrilise progressioonina.

5.1.2. Arvutusvalemid

AAHSTO meetod kasutab konstruktsioonile määratud struktuuriarvu SN (Structural Number), mis on katendilt nõutava tugevuse, aluspinnase kandevõime, prognoositud liikluskoormuse ja teenindustaseme vähenemise kombinatsioon.

Elastsete katendite puhul vajalik struktuuriarv on sõltuvuses kumulatiivsest liikluskoormusest. Vajaliku struktuuriarvu määramiseks on ka koostatud nomogramm, kus saab vastavalt erinevatele määratud projektsuurustele selle leida. Valemi kujul näeb see välja järgmiselt:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_0 + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,2 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10}(M_r) - 8,07 \quad (6)$$

kus

SN – ristlõike nõutav struktuuriarv;

W_{18} – kumulatiivne liikluskoormus 80 kN (8t) normkoormusest;

Z_R – usaldusväärsusindeksi R standardhälbe norm;

S_0 – kombineeritud standardhälve prognoositava liikluskoormuse ja teenindustaseme vahel (AASHTO soovib seda vahemikus 0,40 – 0,50);

Δ PSI – teenindustaseme indeks, mille suurus määratakse vahemikus 1 - 5. Suurus 2,5 vastab katendi kriitilisele seisundile ja vajaks lähiajal taastamist, näiteks ülekatet. Antud juhul on tegemist algselt teele määratud teenindustaseme indeksi (P_0) ja lähteandmetes määratletud kasutusperioodi (P_t) lõpul oleva teenindustaseme indeksi suurusega. AAHSTO järgi on P_0 4,2 ning vähim P_t põhiteedel 2,5 ja vähese liiklusega teedel 2,0;

M_r – aluspõhja elastsusmoodul (ühikuks on psi; 1 psi = 6,9kPa).

Struktuuriarv SN arvutatakse järgnevalt:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \quad (7)$$

kus

a_i – kihi i kihitegur;

D_i – kihi i paksus;

m_i – kihi i niiskustingimusi arvestav tegur (tabel 8.).

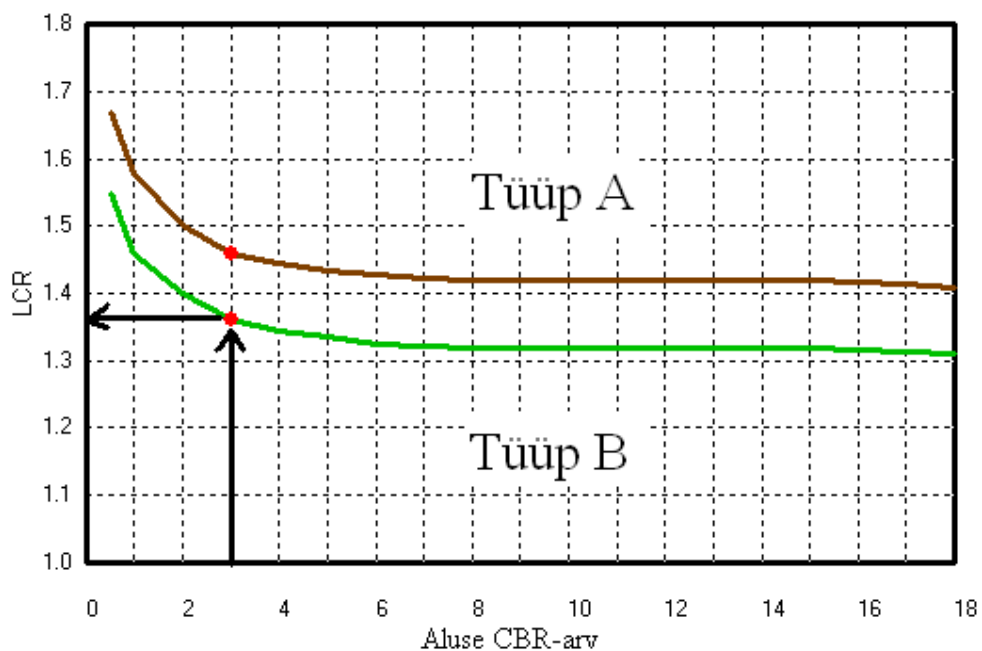
Tabel 8.

Niiskustingimused ja nende mõju

Drenaaži kvaliteet	Küllastumisele läheneva aja osa %			
	kuni 1m	1 - 5m	5 - 25m	üle 25m
Suurepärase	1,4 - 1,35	1,35 - 1,3	1,3 - 1,2	1,2
Hea	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,0	1
Rahuldav	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,0 - 0,8	0,8
Halb	1,15 - 1,05	1,05 - 0,8	0,8 - 0,6	0,6
Väga halb	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,4	0,4

Geovõrkude (ka tekstiilide) kasu konstruktsioonis võib näha kihiteguri (LCR; Layer Coefficient Ratio) abil. Selle väärtus on alati üle ühe, ehk ta parandab arvutustes kandevõimet läbi struktuuriarvu SN suurendamise. Igal tootel turul on omad omadused kuidas ta käitub erinevates olukordades; need on tehtud kindlaks läbi laboratoorsete testide. Laboratoorsete katsetuste tulemused peavad olema sõltuvad polügonil kindlaks tehtud omadustega, pärast võrreldakse mõlemaid katseid omavahel ning

koostatakse graafik. Iga tootja on teinud oma toodetele katsetused ja need määratakse graafikute alusel vastavalt aluspinnase kandevõimele (joonis 12).



Joonis 12. LCRi leidmine. Tüüp A: Tenax LBO 202 kahe-suunaline ekstruuderdatud geovõrk; Tüüp B: Tenax LBO 330 kahe-suunaline ekstruuderdatud geovõrk. (18)

Valemi kujul näeb LCR välja:

$$\frac{SN_r}{SN_u} \cdot \alpha_2$$

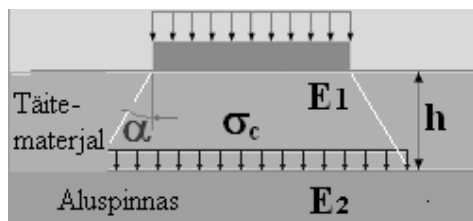
(8)

kus

SN_r - geovõrguga armeeritud ehituse struktuurarv;

SN_u - armeerimata ehituse struktuurarv;

α_2 – koormuse jaotusnurk (joonis 13).



Joonis 13. Koormusjaotusnurga asukoht

Armeeritud ja armeerimata konstruktsiooni struktuuriarvud määratakse samadel tingimustel (kihipaksused, aluspinnase E-moodul ja lubatud maksimaalne roopa sügavus), kuid kasutades erinevaid kasutusperioode.

Kihitegurit LCRi kasutatakse armeeritud aluste struktuuriarvu arvutuses:

$$SN_r = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 LCR + a_3 D_3 m_3, \quad (9)$$

või kandva kihi paksuse arvutamises (lihtsustusena oletatakse, et drenikihti ei ole),

(10)

või asfaldikihi paksuse vähendamise arvutamises

(11)

5.1.3. AAHSTO meetodi järgi aste-astmelt katendi arvutamine

Ajaliste piirangute määramine:

- analüüsiperiood – määratakse projekteeritav eluiga, mille jooksul konstruktsioon peab vastu pidama, võetakse arvesse ka kõik prognoositavad remondid;
- kasutusperiood – aeg ehitamise ja taastamise või taastamiste vahel. Eestis kasutatakse enamasti 15a;

- ennustatava liikluskoormuse määramine. Määratakse kumulatiivne liikluskoormus 8t teljest, mis tuleb teisendada ümber 10t teljeks. Kui kasutusperiood on võrdne analüüsiperioodiga, siis on vaja teada vaid kumulatiivset liikluskoormust. Kui kasutusperiood on analüüsiperioodist lühem, on vaja määrata kumulatiivse liikluskoormuse sõltuvus ajast.

Usaldusväarsuse taseme määramine:

- tee liigi määramine (linnadevaheline tee, kogujatee jne);
- usaldusväarsuse taseme määramine;
- standardhälbe määramine, mis on kooskõlas kohalike oludega (vahemikus 0,40 – 0,50 – mida väiksem arv, seda suuremaks läheb varutegur. AAHSTO soovib enamasti kasutada 0,45).

Keskkonnaalaste probleemide määramine - kui külmakerkealdis on antud piirkond, missugused on pinnaste keemilised koosseisud (liiga leeliselised või happelised). Nendest oleneb võrgu valmistusmaterjal.

Teenindustaseme indeksi määramine (1 - 5):

- uuel teel on see AAHSTO andmeil 4,2 (p_0);
- määra absoluutselt madalaim aksepteeritav indeks p_t – püsikatenditele soovitatakse 2,5, madalama liiklusedusega teedele 2.0.

Materjalide omaduste määramine. AAHSTO meetodis kasutatakse materjalide elastsusmooduleid:

- eestis kasutatavate materjalide elastsusmoodulid on olemas projekteerimise juhendis;
- läbi materjalide tugevusomaduste määratakse, enamasti tabelitega, kihtide tegurid. Aluse puhul kehtib ka seos:

$$a_2 = 0,249 \log(E_{BS}) - 0,977, \text{ kus} \tag{12}$$

E_{BS} – aluse elastsusmoodul (psi).

Niiskuse mõju määramine – võetakse arvesse dreneaži mõju (m).

Katendi struktuurarvu määramine – vajalikku struktuurarvu suurust saab määrata vastavalt spetsiaalsele nomogrammile (on esitatud lisas) või lahendades eespool esitatud valemi.

Kihipaksuste määramine – struktuuriarv konvekteeeritakse erinevate kihtide paksusteks:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \quad (13)$$

Vajaliku struktuuriarvu saavutamiseks on palju kombinatsioone erinevate kihipaksustega. Siiski tuleb arvestada erinevate miinimumnõuetega nendele, Eesti puhul on need esitatud elastsete teekatendite projekteerimisjuhendis ning AAHSTO järgi tabelis 9.

Tabel 9.

Minimaalsed kihipaksused sentimeetrites vastavalt liikluskoormusele

Kuulatiivne liikluskoormus, ESAL	Asfaltbetoon (cm)	Kandev kiht (cm)
<50000	2,5	10,0
50000 – 150000	5,0	10,0
150001 – 500000	6,5	10,0
500001 – 2000000	7,5	15,0
2000001 – 7000000	9,0	15,0
>7000000	10,0	15,0

Kui on teada konstruktsiooni struktuurinumber ja kihipaksused, **lisatakse arvutusele juurde** geovõrk eespool kirjaldatud viisi kohaselt läbi LCR.

5.2. Perkinsi meetod

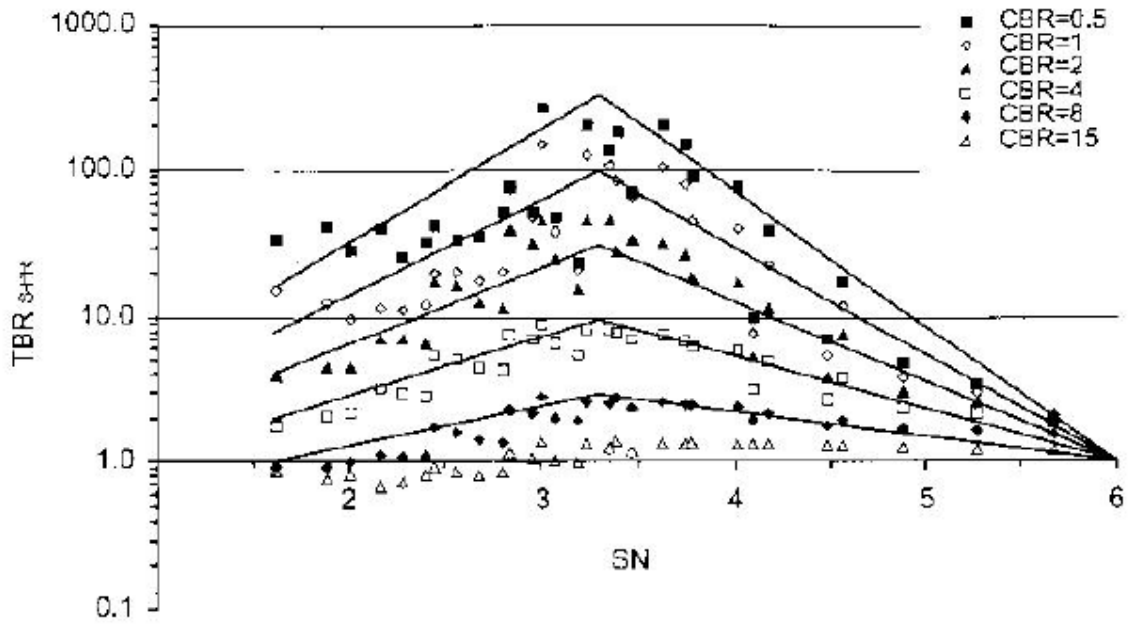
S. W. Perkins on kasutanud oma arvutus/analüüsimeetodis elementprogrammi, kus kihid on lihtsustatud erinevateks elementideks, k.a geovõrk. Armeervõrgud on asetatud kandva kihi põhja. Meetodi kriteeriumiks on kasutatud aluspinnase pealispinna muutust ning kandvas kihis tekkivaid

pingeid. Need on lisatud empiiriliste deformatsioonimudelite abil võrkude kasutamisest saadavale kasule, mis on siis kas katendi eluea pikenemine või kihipaksuste vähenemine. Roopa sügavuse arvestamine toimub tuginedes mitmete uurimisasutuste kasutatule mudelile, mis piirab selle 12,5 mm peale.

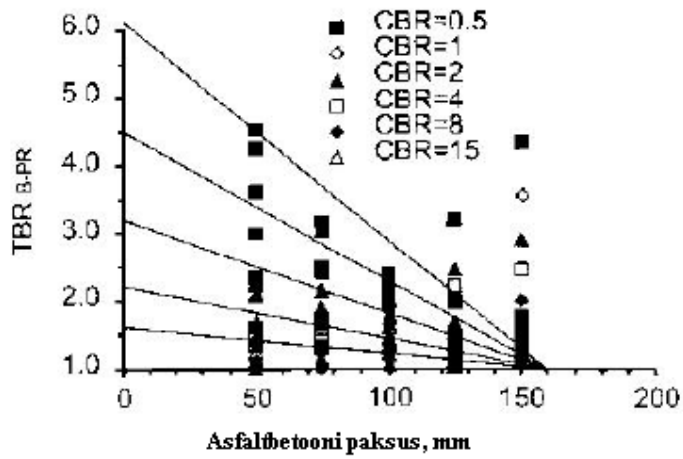
Arvutusmeetodit siinjuures käsitlema ei hakka, kuna mõningad parameetrid, mida ei saa muuta, ei sobi Eestis kasutamiseks. Sobimatuteks piiranguteks on näiteks see, et ta on kalibreeritud kasutamaks vaid 40 kN rattakoormust, mida muuta ei saa (Eestis kasutatakse staatilist teljekoormust ja dünaamilist koormust paarisrattale – A koormusgrupi veoautode puhul on need vastavalt 100 kN ja 65 kN ehk üksikrattale teeb see 50 kN). Aluspinnasesse tekkiva roopa sügavus, mida samuti ei saa muuta, on kalibreeritud 12,5 mm peale. Võib siiski oletada, et teed, millel on lubatud roopasügavust rohkem, saavad armeerimisest suuremat kasu. Piiravaks teguriks on veel see, et arvutusmeetod on tehtud ainult paigaldamiseks võrk kandva kihi alla, ega seda saa kasutada kui soovitaks panna see mujale (näiteks paksemate kihtide puhul tõsta võrk killustikukihi keskele).

Siiski meetodi üldistused ja järeldused võimaldavad hinnata geovõrkudest saadavat kasu ja aitavad läbi selle näha geovõrkude kasulikkust. Näiteks arvestab meetod seda, et armeering mõjutab konstruktsiooni materjale, hoides neid koos. Sellest tulenevalt pingete summa kasvab, mis omakorda suurendab materjalide jäikust. Elementprogrammiga tehtud vaatluste põhjal tuletatud järelduste pealt on tehtud kindlaks, et pingete summa on suurim poolitatud koonuses, mille ülemine osa on kandva kihi peal koormuse all läbimõõduga 150 mm ja väheneb sellest allapoole liikudes kaldega 1,72:1 (vertikaalsuund:horisontaalsuund).

Antud meetoditega arvatud armeeringust tulenev kasu on näha joonistelt 14 ja 15. Suurim kasu võrkudest saadakse struktuuriarvu $SN = 3.3$ juures pehme aluspinnase juures ($CBR = 0.5$ ehk umbes 5 Mpa). Suurte struktuuriarvude ($SN > 6$) puhul isegi nõrkade aluspinnaste juures ei ole võrkudest kasu pidades silmas alusele roopa tekkimisi. $SN = 6$ näiteks konstruktsioonide puhul, kus asfaltbetooni paksuseks on 14 cm, kandev kiht 30 cm ning jagav ja drenikiht kokku 50 cm. $SN = 1.6$ juhul, kui asfalt on 4 cm, kandev kiht 10 cm ja drenikiht 10 cm. Jooniselt 15 on näha, et suurte asfaldipaksuste puhul ei ole võrkudest eriti kasu arvestades roopa teket kandva kihi peal. Kõige efektiivsem kasutus geovõrkudele oleks juhul, kui asfalt oleks u. 5 cm ning aluspõhi nõrk – 5 Mpa. [16]



Joonis 14. Geovõrgu kasutegur vastavalt struktuuriarvu suurusele



Joonis 15. Geovõrgu kasu asfaldi paksuse ja aluse kandevõime vahelise seosena

6. GEOVÕRKUDEGA TUGEVDATUD SIIRDEKATENDITEGA TEEDE PROJEKTEERIMINE

Geosünteedid on õigustanud oma kasutuselevõttu. Katteta (siirdekateendiga) teede puhul, kasutades geosünteeete, on võimalik vähendada kihipaksusi või suudab tee kanda rohkem koormust samade kihipaksuste juures. Tavaliselt kasutatakse kahte tüüpi geosünteeete: tekstiile ja võrke. Nende tööpõhimõtted erinevad suuresti. Kui tekstiilid käituvad vaid separeerijatena, siis võrgud lukustavad tänu oma avadele kandva kihi materjali endasse (muidugi võrgu ava suurused tuleb valida vastavalt materjali terasuursele). Efektiivne lukustus sõltub võrgu tasapinnalisest jäikusest, ribide stabiilsusest ning sõlmedest viimaste vahel.

Teoreetiliselt peaks saama ka siirdekateendite arvutamisel kasutada AASHTO eelpool tutvustatud katendiarvutuse meetodit, kuid välja on töötatud ka spetsiaalselt nendele teedele mõeldud viise. Kuna enamasti ajutistele teedele või väga vähese liikluskoormusega teedele pole enamasti muid nõudeid kui vaid läbitavus, siis pole vaja arvestada nii paljude teguritega kui jäikade ning elastsete katendite arvutamisel.

Madala liiklusintensiivsusega teede – sinna kuuluvad ka katteta teed – arvutamisel kasutab AAHSTO enamasti tabeleid ja monogramme. Vastavalt ilmastikutingimustele on koostatud tabelid, kust tuleb valida väärtused vastavalt niiskusele, mulde veega küllastatuse astmele ja dreenomadustele ning elastsusmoodulile. Tuleb määrata lubatav maksimaalne roopa sügavus ja minimaalne teenindustaseme indeks. Seejärel kasutatakse nomogramme määramaks lubatud maksimaalne ekvivalentne liikluskoormus toetudes erinevatele vajalikele andmetele. Katteta teede ning ajutiste teede puhul on tootjad ja erinevad spetsialistid välja töötanud teistele alustele toetuvaid arvutusmeetodeid kui AASHTO meetod.

Esimese meetodi töötas välja U.S. Forest Service geotekstiilide peale 1970ndatel. Seda hakkasid edasi arendama teadlased J.P. Giroud, Ph.D. ja L. Noiray Ph.D., kes said valmis oma meetodi aastal 1981. Antud meetod oli koostatud tekstiilidele. 1985 tegi J.P. Giroud, Ph.D. esimese arvutusmeetodi ka võrkudele, mille Tensar enda tarbeks kohandas ja hakkas kasutama aastal 1986. Sama meetodit, aga ka vastavalt endale kohandatult kasutas pikalt Tenax. Uuemad kasutusesolevad teooriad on Giroud-Han (2004) ja U.S. Army Corps of Engineersi välja töötatud arvutusmeetod (2003). Uus versioon on ka J. Leng, Ph.D. ja M. Gabr, Ph.D. (2006) välja antud mudel, mida kasutab oma arvutustes itaalia firma Tenax. Järgnevalt vaatame neid meetodeid siirdekatendite arvutamiseks.

6.1. Giroud – Noiray (1981) ja Giroud - Ah-Line-Bonaparte (1985)

Giroud - Noiray (1981) arvutusmeetod on tehtud geotekstiilidele ja Giroud – Ah-Line-Bonaparte (1985) geovõrkudele, kuid need kaks on siin ühendatud ja kohandatud jäikadele geovõrkudele. Antud meetodit kasutas varem peamiselt Tenax. Arvutus koosneb järgmistest sammudest: [10]

Esiteks tuleb arvutada antud valemi järgi armeerimata katendi paksus:

$$h'_0 = \frac{125,70 \log(N) + 496,50 \log(1000P) - 294,14r - 2412,42}{(1000c_u)^{0,63}} \quad (14)$$

kus

h'_0 = kihipaksus meetrites

P = üksiktelje koormus, kN

r = lubatud maksimaalne roopasügavus, m

N = teljeületuste arv (ESAL)

c_u = veega küllastunud pinnase nihketugevus, kPa

Empiiriline seos nihketugevuse ja CBRi vahel on $c_u = 30 \cdot \text{CBR}$ (kPa).

Teiseks tuleb arvutada armeerimata kihipaksus h_0 kasutades kvaasistaatilisest (aeglaselt muutuvat) analüüsi ühekordse teljeületuse puhul:

$$h_0 = \frac{-(B + L) + \sqrt{(B + L)^2 - 4(BL - c_1)}}{4 \tan \alpha_0} \quad (15)$$

kus

$$c_1 = \frac{P}{2\pi c_u}$$

$$B = \sqrt{\frac{P}{P_c}} \quad L = \frac{B}{\sqrt{2}}$$

kui arvutatakse veokitele ja muudele autodele, millega on lubatud sõita avalikus kasutuses olevatel teedel (on-highway trucks);

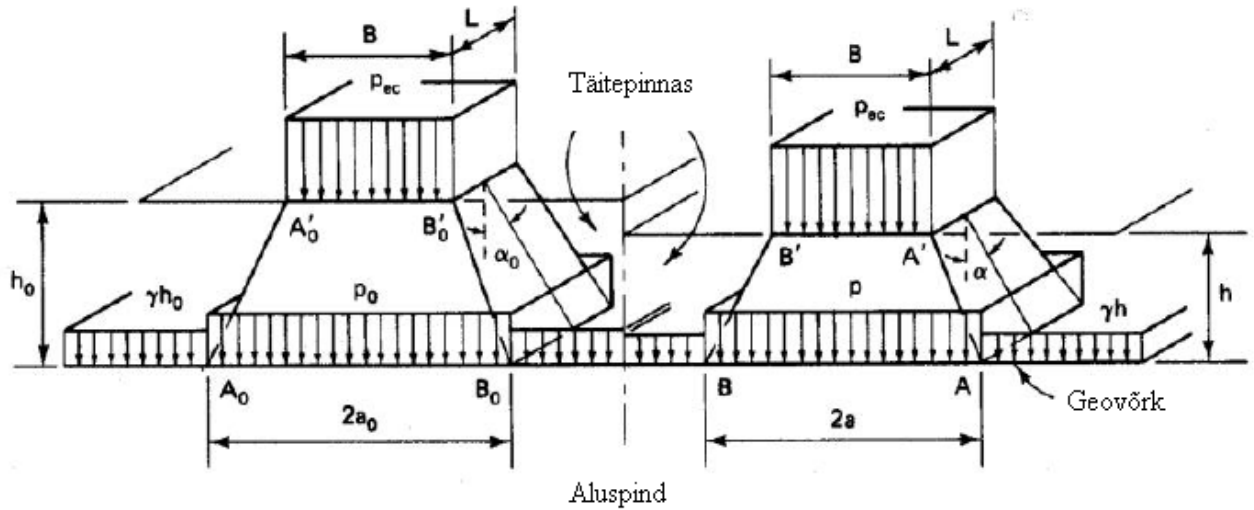
$$B = \sqrt{\frac{P\sqrt{2}}{P_c}} \quad L = \frac{B}{2}$$

kui teed arvutatakse veokitele, millega ei ole lubatud sõita avalikus kasutuses olevatel teedel, eelkõige liigse massi tõttu (off-highway trucks).

kus

P_c = rehvirõhk, kPa

α_0 = koormuse jaotusnurk, kraadides; Giroud-Noiray soovitab $\alpha_0 = 0,6$.



Joonis 16. Koormuse jaotus armeerimata ja armeeritud tee puhul

Kolmandaks leitakse vajalik kihipaksus h armeeritud konstruktsiooni korral kasutades kvaasistaatilist (aeglaselt muutuvat) analüüsi ühekordse teljeületuse puhul:

$$\frac{K \cdot \epsilon}{\gamma \cdot h} = \frac{p_{ec}}{p} \quad (16)$$

kus

$$\frac{K}{\epsilon} = \frac{K \cdot \epsilon}{\epsilon^2}$$

kus

K ja ϵ on vastavalt geovõrgu tõmbejäikus (tensile stiffness) ja tema venivus. Näiteks on võrgu tehnilises iseloomustuses kirjas, et tõmbejäikus on 525 kN/m (Tenax LBO 330 SAMP). Tõmbejäikust ei tohi segamini ajada tõmbetugevusega. Sama võrgu tõmbetugevus on mõlemas suunas 10,5 kN/m 2% venivuse juures. Tõmbejäikus on pinge ja elastse venivuse suhe tõmbetugevuse katsel. Mida suurem on tõmbejäikuse arv, seda suurem on geovõrgu jäikus – missugust jõudu on vaja rakendada saavutamaks teatud venivuse protsenti (näiteks antakse ette, et võrk võib venida 0,5% või 2%). Tõmbejäikus arvutatakse välja valemitega tõmbetugevuse katsetulemustest. Tõmbetugevuse

testimismeetodid plastidele, jäikadele polümeeridele (seega ka jäikadele geovõrkudele) on EVS-EN ISO 527-1,-2 ning geotekstiilidele ja pehmetele geovõrkudele EVS-EN ISO 10319.

$$a = 0.5(B+2h*\tan\alpha)$$

$$a' = 0.5(e-B-2h*\tan\alpha)$$

kus

e - teega risti olevate telgede omavaheline kaugus mõõdetuna nende keskpunktist;

$$\text{Kui } a' > a: \quad s = \frac{ra'}{a+a'} \quad \text{ja} \quad \varepsilon = \frac{b+b'}{a+a'}$$

$$\text{Kui } a' < a: \quad s = \frac{2ra^2}{2a^2 + 3aa' - a'^2} \quad \text{ja} \quad \varepsilon = \frac{b}{a} - 1$$

Geovõrgu venivus ε on määratud järgmiste valemitega:

$$\frac{a}{b} - 1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2s}{a}\right)^2} + \frac{a}{2s} \ln \left(\frac{2s}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{2s}{a}\right)^2} \right) - 2 \right]$$

$$\frac{b'}{a'} - 1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2(r-s)}{a'}\right)^2} + \frac{a'}{2(r-s)} \ln \left(\frac{2(r-s)}{a'} + \sqrt{1 + \left(\frac{2(r-s)}{a'}\right)^2} \right) - 2 \right]$$

Geovõrguga armeerimine parandab koormusjaotusnurka läbi lukustussüsteemi geovõrgu ja kandva kihi materjali vahel. See esitatakse suhtena $\tan\alpha/\tan\alpha_0$, kus α ja α_0 on jaotusnurgad kraadides vastavalt ilma ja koos võrguga. Giroud'i määras selleks vahemiku 1,1 – 2,5. Suhe on sõltuvuses geovõrgu pakutava lukustuse ulatuse ja eraldamise efektiivsusega. Näiteks Tenax teovõrkudel esitatakse antud suhe järgmiselt:

$$\tan\alpha/\tan\alpha_0 = 1,1 + 0,0015K$$

K – geovõrgu tõmbejäikus.

Neljandaks arvutatakse kandva kihi materjali vähenemine Δh :

$$\Delta h = h_0 - h$$

Viiendaks arvutatakse vajalik kihipaksus h' :

$$h' = h'_0 - \Delta h$$

Tähtis on veel meeles pidada, et kandva kihi materjal peab olema vähemalt 80 CBR tagamaks piisava koormuse jaotuse.

6.1.2. Limiteeringud

Antud meetod põhineb peamiselt membraanefektile ja ta hakkab toimima alles roopa sügavuste juures üle 100 mm. Samuti mõned uurimisorganid on väitnud, et antud arvutusmeetod on ebatäpne ja kõik tootjad seda enam ei kasuta, kuna väidetavalt ta ei kajasta tegelikult seda, mis konstruktsioonis toimub. Suurimaks miinuseks on see, et selle juures ei võeta arvesse geovõrgu lukustamist ja kandva kihi omadusi. See pole sugugi üllatav, kuna ajal, mil ta välja töötati, ei olnud geovõrgud veel nii levinud ja katsetustulemusi oli nii vähe. Siin esitatud meetodit on siiski üritatud kohandada ka jäikadele võrkudele, mis toimivad just peamiselt lukustamise peale. Nähtavasti asi ei toimi nii, kuidas peaks toimima (algselt on ta siiski esitatud arvutamaks membraanefekti mõju) ja seda kasutanud firma on võtnud kasutusele teise meetodi, millest on juttu hiljem.

6.2. Giroud-Han (2004)

Tegemist on teoreetiliselt välja töötatud ja siis katsetuste teel kalibreeritud projekteerimismeetodiga, mis autorite sõnul asendab eelnevalt kasutusel olnud Giroud – Noiray (1981) arvutusmeetodi geotekstiilidele ja Giroud (1985) geovõrkudele. Meetodi arendajad J.P. Giroud, Ph.D. ja Jie Han, Ph.D. nimetavad seda ise kõige usalduväärsemaks lahenduseks, mis hetkel on välja töötatud. [8]

Eelnevalt arvutustes kasutati parameetreid nagu liiklusintensiivsus, rattakoormus, rehvirõhk, aluspinnase tugevus, roopa sügavus ja geosünteedi tekitatud armeerimise tulemusel tulenev tugevuse

kasv. Uus meetod lisab nendele juurde parema käsitlemise koormusjaotusnurgast, kandva kihi materjali tugevuse, lukustusmehhanismi geosünteedi ja kandva kihi materjali vahel ning geosünteedi tasapinnalise tugevuse. Selgelt on näha, et meetod arvestab eelkõige geovõrkude omadusi, kuna see annab paremaid tulemusi kui tekstiil. Siiski sobib ta kasutamiseks ka tekstiilide ja ka armeerimata teede puhul, nagu hiljem näha.

6.2.1. Projektsuurused

Oletatakse, et kasutatakse vaid ühte kihti geosünteedi kandva kihi ja aluspinnase vahel. Lihtsustusena oletatakse, et alus on homogeenne materjal sügavuseni, kus võiks veel esineda pinnase nihkeid liikluskooormusest. Klassikalise kandevõimeteooria kohaselt on see sügavus umbes 1,5 m.

Telje geometria on esitatud joonisel 17. Rattakoormus P on pool teljekoormusest. Rattakoormuse ja rehvirõhu vaheline seos on järgmine:

$$P = pA \quad (17)$$

kus

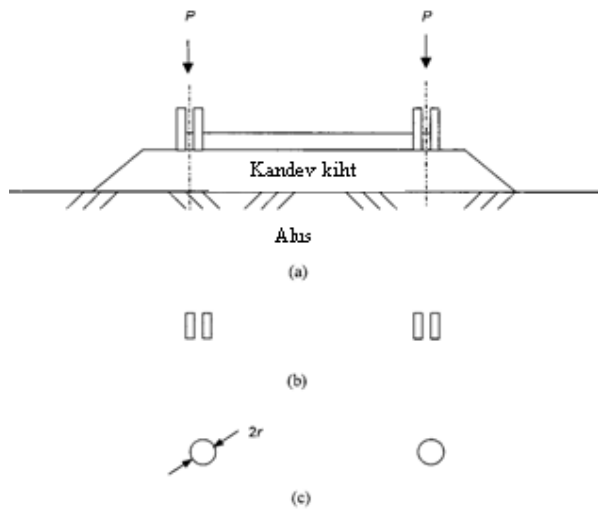
P – ratta koormus (kN);

A – rehvi kontaktpind teega (m^2);

p – rehvirõhk (kPa).

Rehvi kontaktpind arvutatakse $A = \pi r^2$ ja kontaktpinna raadiuse valem on:

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}} \quad (18)$$

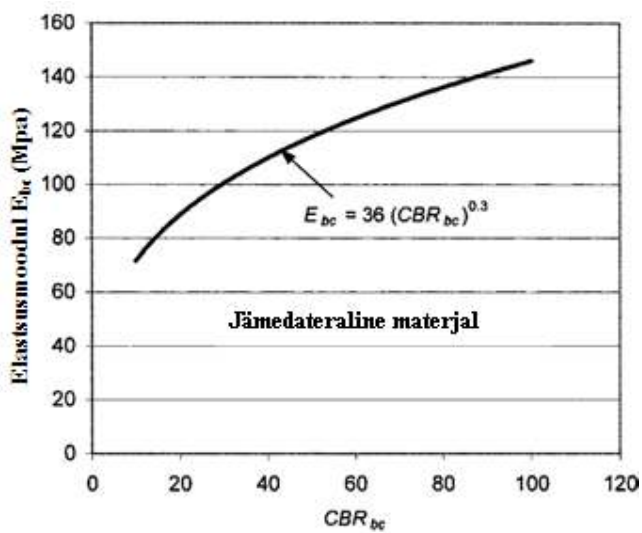


Joonis 17. Rehvi kontaktpind

Kandva kihi ja aluse CBR-arvud on erinevad ning nende elastsusmooduliks muutmine on ka erinev. Kandeva kihi puhul AAHSTO juhend pakub välja joonise 18 ning valemi:

(19)

E_{bc} – kandva kihi elastsusmoodul (Mpa);



Joonis18. Kandva kihi CBR-arvu teisandamine E-mooduliks

Aluspinnas oletatakse olevat küllastunud olekus pehme pinnas (möll, savi). Nihketugevus ja CBR on aluse puhul seotud järgnevalt:

$$C_u = 30 \cdot \text{CBR} \quad (20)$$

Elastsusmoodul:

$$E_{sb} = 10,35 \cdot \text{CBR}. \quad (21)$$

Geovõrgu avade stabiilsus on leitud olevat otseses seoses võrgu toimivusega. Ava stabiilsus tähendab tasapinnalist jäikust ja ribide ning sõlmede stabiilsust (võrkude tehnilistes spetsifikatsioonides on välja toodud erinevate toodete vastavad näitajad). Lisaks nendele mõjutavad võrgu käitumist veel omadused nagu tõmbetugevus väikeste venivuste juures (kuni 2%), ribi läbimõõt ja ristlõike kuju, sõlmede tugevus ning ava suurus.

6.2.2. Kandevõimefaktor

Erinevatest andmetest ja kirjandusest võib lugeda, et armeerimata teede puhul kandevõimefaktoriks pakutakse vahemikku 2,8 – 3,3. Giroud ja Noiray (1981) kasutasid 3,14, mis elastsuspiir küllastunud aluspinnase puhul.

Armeeritud teede puhul Giroud ja Noiray (1981) soovitasid, et katteta teede puhul kasutataks absoluutset kandevõimefaktorit (tekib siis, kui aluspinnal tekib tasakaalupiirseisund), sest armeering takistab lokaalsete nihete teket ja seeläbi hoiab vertikaalsed deformatsioonid suhteliselt väikestena isegi kui koormused on ligilähedased absoluutsele kandevõimele. Nad kasutasid $N_c = 5,14$ geotekstiilidega aluste puhul, kuna see on absoluutne kandevõimefaktor küllastunud dreenimata aluspinnases, null nihketugevuse juhtumil (nihkepingeid ei ole) kandva kihi ja aluse tasapinnal (kokkupuutepunktis). See kehtib juhul, kui kandev kiht on separeeritud alusest geotekstiiliga, milles ei teki kandva kihi teradega lukustust. Tuleb veel mainida, et 5,14 kehtib tasapinnalise deformatsiooni puhul kahedimensioonilises süsteemis.

Teoreetiline absoluutne kandevõimefaktor tasapinnalisel kahedimensioonilisel juhtumil maksimaalse seesmise nihkepinge puhul on aluspinnases $N_c = 5,71$. Geovõrguga armeeritud konstruktsiooni puhul on see väärtus valitud sellisena, kuna maksimaalne seesmine nihkepinge asetseb aluspinna tasapinnal järgneva kahe kahe mehhanismi toimel, mille tulemusel toimub lukustamine geovõrgu ja kandva kihi vahel:

- kandva kihi materjali külgsuunalised liikumised on geovõrguga takistatud ja läbi selle liikluskoormusest tulenevad nihkepinged alusele ei mõju;
- täitematerjali terad on surutud võrgu avadesse, tekitades nii maksimaalse hõõrde kandva kihi ja aluspinnase kokkupuutepunktis, kandva kihi külgsuunalised liikumised on takistatud (sel juhul ei hakka ka alus liikuma), ja maksimaalne sisemine nihkepinge koondub aluse peale; aluspinnas ise nihkepingeid liiklusest vastu võtma ei pea (nii saab rakendada kogu aluse kandevõime).

Maksimaalse sisemise nihkepinge ülekandmisel kandva kihi ja aluspinnase kokkupuutepunkti geovõrgu kanda tõstabki aluspinnase kandevõimefaktorit 5,14 juurest 5,71 peale. Erinevate andmete kohaselt on teekonstruktsiooni maksimaalsed liiklusest tulenevad nihkepinged 8 – 12 cm sügavusel tee pinnast. Siin käsitletud nihkepingete all mõeldakse neid, mis jõuavad läbi kandva kihi ka aluspinnasele, mis ei pruugi olla kõige suuremad teekonstruktsioonile mõjuvad nihkepinged.

Kuna kontaktpind ratta ja kandva kihi vahel on umbkaudu ring, võib teoreetiliselt kasutada antud meetodit ka telgsümmeetrilise juhtumi (axi-symmetric condition) puhul. Siiski, antud meetodi jaoks on valitud tasapinnaline deformatsioon kahedimensioonilises süsteemis (plain-strain two-dimensional case), kuna väidetavalt kajastab see paremini kanaliseeritud liiklusolukorda (autod sõidavad samades jälgedes, nagu rööpaid mööda) ja see on konservatiivsem (varutegur on suurem). Teoreetilised absoluutse kandevõimeteguri väärtused telgsümmeetrilises süsteemis on 5,69 null nihkepinge (zero interface shear stress) (mis on suurem kui 5,14) juures ja 6,04 maksimaalse sisemise nihkepinge juures (maximum inward interface shear stress) (mis on suurem kui 5,71).

6.2.3. Potentsiaalne kandevõimefaktor

Potentsiaalne kandevõimefaktor osutab fakteile, et vaid murdosa aluspinnase kandevõimest on kasutusel. Oletatakse, et aluspinnas jõuab asjakohase kandevõimeni (armeerimata teede puhul elastsuspiir ja armeeritud teede puhul absoluutne kandevõime ehk tasakaalupiiriseisundi teke) kui aluse ja kandva kihi vahele tekib 75 mm deformatsioon (roobas). [9]

Deformatsioon seal on väiksem kui roopa sügavus, sest osa roopa sügavusest jääb deformatsiooniga kandvasse kihti. Seetõttu, mida paksem kiht, seda väiksem deformatsioon aluspinnal. Kui teenindustase on määratud lubatud roopa sügavusele 75 mm, on aluspinna deformatsioon 75 mm juhul, kui kandva kihi paksuseks on null ja on väiksem kui 75 mm kui kandva kihi paksus on üle nulli. Seetõttu potentsiaalse kandevõimefaktori suurus on 1,0 kandva kihi puudumisel ning seda rohkem alla 1,0 mida paksem on kandev kiht.

Kuna kandva kihi paksus on arvutustes minimaalselt määratud 0,10 m peale, ei saa potentsiaalne kandevõimefaktor kunagi olla 1,0 vaid peab jääma alla selle. Giroud ja Han (2004) meetodis on potentsiaalse kandevõimefaktori arvutamiseks esitatud valem:

$$m = \frac{s}{f_s} \left[1 - 0,9 \exp^{-\left(\frac{r}{h}\right)^2} \right] \quad (22)$$

Antud valem on sees valemis 26 ning vastavad sümbolid on selgitatud seal.

6.2.4. Lubatud roopa sügavuse ja potentsiaalse kandevõime faktori seos

Nagu juba mainitud, tüüpiline siin kasutatav roopa sügavus on 75 mm. Siiski, projekteerija võib soovida kasutada 100 mm roobast või hoopis väiksemat suurus. Mida väiksem lubatud roopa sügavus, seda paksem peab olema kandev kiht. Kui roopaks valitakse üle 75 mm, tuleb kontrollida arvutustega

aluspinna deformatsioone; arvutusmeetodis on seatud tingimuseks, et sellest arvust suuremad roopasügavused alusel tähendavad kandevõimepiiriseisundi ületamist. Kontrolli saab teostada arvutades välja potentsiaalne kandevõimetegur m , mis ei tohi olla suurem ühest. Kui $m > 1$, tuleb kandva kihi paksust suurendada või valida väiksem lubatav roopa sügavus.

Teine lähenemine kandevõimepiiriseisundile on kandva kihi paksuse võrdlemine minimaalse kihipaksusega (h_{\min}) arvutatult järgneva valemiga:

$$h_{\min} = \frac{r}{\sqrt{\ln\left(\frac{0,9}{1 - \frac{f_s}{s}}\right)}} \quad (23)$$

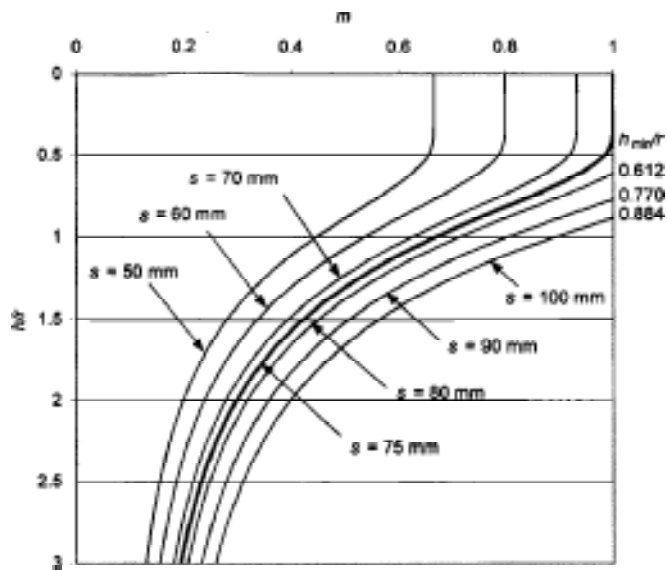
kus

f_s – 75mm;

s – lubatud roopa sügavus (mm);

r – rehvi kontaktpinnaala raadius (m).

100 mm lubatud roopa sügavuse juures annab arvutustulemus kandva kihi paksuseks $0,884r$. Kui rehvi kontaktala raadius on 0,15 m, on minimaalseks kandva kihi paksuseks 0,13 m. Praktiliselt võttes võib üldistada, et 100 mm roopa võib valida, kui kandva kihi paksus on võrdne või suurem rehvi kontaktpinna raadius. Joonis 19 toob välja koefitsendi m , suhte h/r ja roopasügavuse vahelise seose. Samuti saab sealt välja lugeda minimaalsed kihipaksused.



Joonis 19. Potentsiaalne kandevõimefaktor m .

6.2.5. Armeerimine ja kandev kiht

Kui ratta koormus on väiksem kui aluspinna kandevõime, armeerimist vaja ei ole. Aluse kandevõimet saab arvutada järgmiste valemitega:

$$P_{h=0} = \left(\frac{s}{f_s}\right) \pi r^2 N_c c_u \quad (24)$$

$$P_{h=0} = \left(\frac{s}{f_s}\right) \pi r^2 N_c c_u CBR_{sg} \quad (25)$$

kus

f_s – 75 mm;

s – lubatud roopa sügavus (mm);

CBR_{sg} – aluse CBR;

c_u – dreanimata aluspinnase niidusus;

N_c – kandevõimefaktor;

r – rehvi kontaktpinnaala raadius (m);

f_c – suurus võrdne 30 kPa.

Kandevõime arvutuse tulem valemist on $P_{h=0, \text{ armeerimata}}$. Selle väärtus on sõltumatu teljeületuste arvust. Antud juhtumil, teoreetiliselt kandvat kihti vaja polegi. Siiski kandva kihi minimaalseks paksuseks soovitatakse 0,10 m.

6.2.6. Giroud ja Han (2004) meetodi limiteeringud

Roopa sügavusi on võimalik valida vahemikus 50 – 100 mm. Aluspinnase CBR ei tohi olla üle 5 ja kandva kihi üle 10 CBRi. Kuna reeglina armeerimist vajavad teed ehitatakse nõrkadele alustele (CBR alla 3), siis erilisi piiranguid antud limiteering ei sea. Matemaatilisest seisukohast vaadatuna ei sea meetod mingeid piiranguid ületatavate teljeaarvude (N) kohta. Praktikas reeglina kasutatakse maksimaalset teljeületuste arvu 100000, kuna ehitusmaterjalid (killustik, kruus jne) väsivad ning teekonstruktsioon kaotab kõigest hoolimata oma kandevõime.

Meetodi miinuseks võib lugeda ka seda, et kalibreerimine tehti Tensari võrkudega BX1100 ja BX1200, mida Euroopas ei müüda. Samuti teised tootjad pole veel kasutusele võtnud ava stabiilsusmooduli mõistet ning seda ei mõõdata.

Limiteeringuks võib lugeda veel seda, et membraanefekti pole võetud arvesse, kuna sellel pole mingit seost kihipaksustega, kui lubatud roopa sügavused jäävad alla 100 mm.

Antud meetodis geovõrgu mõju näidatakse kahel moel: läbi kõrge kandevõimeteguri $N_c = 5,71$ ja ava stabiilsusmooduli J . N_c kõrge väärtus eeldab, et lukustus geovõrgu ja kandva kihi materjali vahel on piisav tekitamiseks maksimaalseid seesmisi nihkepingeid aluse/kandva kihi vahel. Ava stabiilsusmoodul peaks suurendama koormusjaotusnurka ehk suurendama kandva kihi võimet jaotada koormusi. Antud meetod oletab, et kõik geovõrgud tagavad piisava lukustuse andmaks välja N_c suuruseks 5,71. Niisiis, ainuke viis eristamiseks erinevaid võrke, on läbi ava stabiilsusmooduli, mis peab olema suurem kui 0,8

$m-N/\circ$. Reaalsus on siiski keerulisem, kuna mõlemad – lukustuse efektiivsus ja koormusjaotusnurk – on seotud erinevate geovõrgu omadustega nagu paksus, jäikus, ribide kuju, avade suurus, kuju ja jäikus, sõlmede tugevus ning tõmbemoodul/tugevus väikese venivuse juures. Tegurite rohkuse tõttu on raske töötada välja arvutusmeetodit, mis neid kõiki arvestaks.

6.2.7. Giroud-Han'i meetodi arvutusvalem

J.P. Giroud, Ph.D. ja Jie Han, Ph.D. arendasid välja uue geosünteedide projekteerimismeetodi katteta teedele kasutades kandevõimeteooriat ning tulemusi empiirilistest katsetustest. Mõningad tähtsad punktid, millega on arvestatud meetodi väljatöötamisel, on: [17]

- aluspinnase kandevõime muutuseid ja sellest tulenevad muudatused;
- teljeületuste arv ja tee teenindustase;
- koormuse jaotusnurga muutus aja möödudes;
- geotekstiilid ja –võrgud töötavad teedel erinevalt;
- mitte kõik geovõrgud ei tööta samamoodi;
- teoreetilisi tulemeid/valemeid on kontrollitud ja kalibreeritud katsetega looduses.

Lisaks kasutatakse veel geovõrgu ava stabiilsusmoodulit ($m-N/\circ$), mis samuti iseloomustab võrgu jäikus- ja lukustusomadusi. Mida suurem number, seda kindlamalt püsib võrk koos ja kuskilt ei hakka koormamisel järgi andma.

Arvestades eelpool toodud tegureid, koormushajuvuse teooriat ning katsetulemusi, töötati välja valem ennustamiseks/arvutamaks välja vajalik kihipaksus, et säiliks nõutav teenindustase antud koormustingimuste ja aluspinnase juures. Antud valemiga tuleb läbi arvutada mitmed võimalikud variandid leidmaks kõige ratsionaalsem lahendus.

$$h = \frac{0,868 + (0,661 - 1,006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1,5} \log N}{\left[1 + 0,204 \left(\frac{3,48\text{CBR}_{bc}^{0,3}}{\text{CBR}_{sg}} - 1\right)\right]} \left(\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\frac{s}{f_s} \left[1 - 0,9 \exp^{-\left(\frac{r}{h}\right)^2}\right] N_c f_c \text{CBR}_{sg}} - 1} \right) r \quad (26)$$

kus

h - kandva kihi paksus (m);

J – geovõrgu ava stabiilsusmoodul (m-N/°). $J = 0$ armeerimata teede puhul, $J = 0$;

N – teljeületuste arv;

P – rattakoormus (kN);

r – ratta kontaktpinna raadius (m);

CBR_{sg} – aluspinnase California (CBR) tegur;

→ nende omavaheline jagatis valemis ei tohi olla üle 5

CBR_{bc} – kandva kihi CBR-arv;

s - lubatav roopa sügavus (mm);

f_s – faktor suurusega 75 mm;

f_c – faktor suurusega 30 kPa;

N_c – kandevõimetegur, mis on $N_c = 3,14$ ja $J = 0$ armeerimata teede puhul, $5,14$ ja $J = 0$ geotekstiiliga armeerimise puhul. Geovõrkudega armeerimisel $N_c = 5,71$ ning J vastavalt võrgule, näiteks Tensar BX1100 puhul $J = 0,32$ m-N/°, BX1200 – $J = 0,65$ m-N/°; Tensari kolmnurkvõrgu TX160 puhul on see $0,36$ ja TX170 – $0,78$.

6.2.8. Arvutamine

Arvutamaks siirdekateendiga teed Giroud – Han (2004) meetodil, tuleb läbida järgnevad sammud:

- arvuta rehvikontaktpinna raadius valemiga 18 ning vali lubatav maksimaalne roopasügavus kui seda pole ette antud. Kui aluspinnase CBR on antud, kuid mitte dreenimata pinnase nidusust, tuleb see arvutada;

- kontrolli, kas aluspinnasel on endal piisavalt kandevõimet võtmaks vastu koormusi ilma geosünteedideta. Seda saab teha kontrollides, kas ratta koormus P on suurem kui aluse kandevõime kasutades valemeid 24, 25 ja $N_c = 3,14$. Kui ratta koormus P on väiksem aluse kandevõimest, kandvat kihti teoreetiliselt vaja pole ja arvutus lõpeb siin. Kui ratta koormus on kandevõimest suurem, läheb vaja kandvat kihti, võimalik et koos geosünteediga;
- määra vajalik kandva kihi paksus armeeritud ja/või armeerimata tee puhul. Valem, mille abil leitakse vajalik kihipaksus, tuleb leida iteratsioonimeetodil. Teisisõnu, esialgne paksus oletatakse. Oletatav väärtus pannakse valemisse 26 koos teiste vajalike suurustega ning kui saadud tulemus erineb oluliselt arvatust, lahendatakse valem uuesti teise kihipaksusega. Arvutust korratakse, kuni oletatav arv on ligikaudselt võrdne arvutatuga. Kui saadud tulemus on väiksem kui 0,10 m, kasutatakse viimast. On võimalik ka, et arvutustulem on negatiivne, sel juhul kasutatakse kandva kihi paksuseks 0,10 m.

6.3. U.S. Army Corps of Engineers

U.S. Army Corps of Engineers on arendanud välja meetodi, mille metodoloogia põhineb algselt U.S. Forest Service poolt välja töötatud meetodile. Sinna juurde on lisatud katsetuste teel saadud tulemid ning välja on töötatud nomogrammide kihipaksuste määramiseks. Soovitavad minimaalsed geovõrkude omadused kasutamaks antud meetodiga, on esitatud tabelis 10. [7: 6]

Geovõrguga armeeritud siirdekateendiga tee projekteerimine nõuab kandevõimeteguri N_c valimist, soovitatavad väärtused on järgmised:

$N_c = 2.8$ arvutades ilma geosünteedideta;

$N_c = 3.6$ geotekstiiliga;

$N_c = 5.8$ geovõrguga.

Järgnevas sammuks on valida sobiv kandva kihi paksus kindlustamiseks vajalik nihketugevus C (psi) ilma geovõrguta konstruktsioonis. Seda saab määrata mõõtmise teel katselõigul või testimisel laboris. Eelnevalt on esitatud ka valemid, kuidas tuletada nihketugevus CBR-arvust. On olemas ka diagrammid teisenduse tegemiseks.

Tee kandevõimet arvutatakse valemiga:

$$CN_c \text{ (psi)}. \quad (27)$$

Edasi toimub kihipaksuse määramine toetudes tabelitele vastavalt sellele, mis liiki veoautod hakkavad sõitma (kas üksikratas, paarisratas või tandemrattad). Näidisjoonis 20 on koostatud üksikrattale rehvirõhuga 550 kPa ning 1000 teljeületusele.

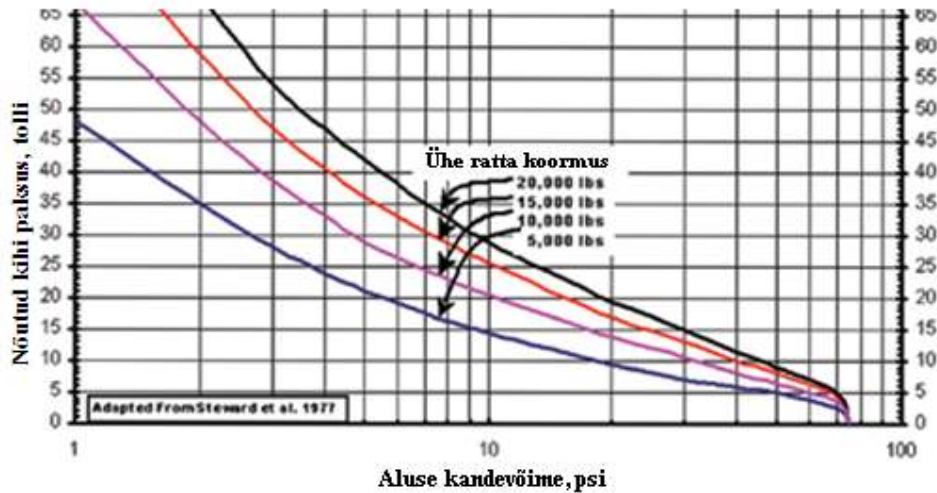
Tabel 10.

Soovitatud geovõrkude omadused

Geovõrgu omadus	ASTM testimismeetod	Miimumväärtused
Ühikkaal	D 5261	305 g/m ²
Ava suurus (MD)	Otsene mõõtmine	25 mm
Ava suurus (XMD)	Otsene mõõtmine	33 mm
Tõmbetugevus 5% venivuse juures (MD)	D 6637	10,2 kN/m
Tõmbetugevus 5% venivuse juures (XMD)	D 6637	17,5 kN/m
Maksimaalne tõmbetugevus (MD)	D 6637	17,5 kN/m
Maksimaalne tõmbetugevus (XMD)	D 6637	30,6 kN/m
Tootmisprotsess	-	Masinaga tõmmatud

MD – tõmmatud võrgu puhul tõmbesuunas

XMD – ristisuund



Joonis 20. Ühe ratta koormus, ühekihiline katend ja rehvirõhk 550 kPa.

6.3.1. Giroud-Han (2004) ja U.S. Army Corps of Engineers arvutusmeetodite võrdlus

Tabel 11 võrdleb arvutamisel saadud tulemusi, mis on tehtud 5cm lubatud roopasügavuse, 550 kPa rehvirõhu ja 1000x10t teljeületuste peale. Tabelist on näha, kui efektiivselt võivad võrgud, vähemalt arvutades, olla.

Tabel 11.

Nõutud kandva kihi minimaalne paksus cm: Giroud-Han (G-H) ja U.S. Army Corps of Engineers (USA)

Aluspinnase CBR	Armeerimata			Geotekstiil			Geovõrk		
	G-H	USA	vahe %	G-H	USA	vahe %	G-H	USA	vahe %
0.5	96	59	39%	72	53	26%	56	43	22%
1.0	64	46	28%	46	41	12%	28	31	-10%
1.5	49	38	22%	34	33	3%	17	23	-39%
2.0	44	33	25%	29	28	4%	12	19	-50%
2.5	43	30	29%	27	24	9%	11	17	-57%
3.0	40	27	32%	23	22	8%	10	15	-50%
3.5	38	26	33%	19	20	-5%	10	15	-50%
4.0	35	24	32%	14	19	-42%	10	15	-50%

Veel võrdlustulemustest niipalju, et nii arvutused kui neid toetavad katsetusmeetodid näitasid, et kihipaksuste vähendamist silmas pidades on (jäigad) geovõrgud efektiivsemad kui geostekstiilid samade tingimuste juures. Nende meetodite juures ainult Giroud-Han rõhub toodete tunnusomadustele⁴. Nende omaduste järgi võrreldakse erinevaid tooteid omavahel. Katsetused ja uuringud on siiski näidanud, et vaid tunnusomadus ise ei ole korrelatsioonis konstruktsioonis toimivusega. Seetõttu peaks küsima tootjatelt katsetulemusi kinnitamaks nende toodete toimivust vastavalt tulevasele projekteeritud tingimustele. Muidugi kõige kindlamad ja usaldusväärsemad tulemused saab tehes ise kõigepealt katselõik ja tuginedes sealt saadud tulemustele projekteerida edasi.

6.4. Tenax`i hetkel kasutatav arvutusmeetod

Tenax on oma meetodit välja arendades tuginenud Leng`i ja Gabr`i (2006) pakutud lähenemisele, mis sisaldab lihtsustatud vertikaalpingeanalüüsi elastsele kahekihilisele süsteemile, kandva kihi deformeerumise korrelatsiooni 2% geovõrgu venimisele ja kandevõime määramist vastavuses lubatud roopa sügavusele.

6.4.1. Kahekihiline süsteem

Siirdekategoriga teed võib lihtsustatult nimetada kahelihiliseks süsteemiks (alus ja kandev kiht). Vastavalt elastsele analüüsile, vertikaaljõud, mis mõjuvad kandvale kihile, on seotud kihipaksusega ning aluspinnase ja kandva kihi elastsusmooduliga. Kihtide moodulite teooria põhineb Odemark`il, kes viis erinevad kihid omavahel kokku – erinevate moodulitega kihid teisandatakse üheks kihiks ning seejärel minnakse edasi Boussinesq homogeense kihi käsitlemisega. [18]

Kahekihilise siirdekategoriga tee puhul kandva kihi moodul teisandatakse samale moodulile, mis on aluspinnasel, lihtsamalt öeldes muudetakse kihipaksust. Hoidmaks muudeteva kihi tegelikku jäikust, teisandatakse moodul vastavasse paksusesse järgmiselt:

⁴ index properties – väärtused, mida mõõdetakse laborites, nt tõmme, struktuurne jäikus, sõlmede jäikus, voolavuspunkt jne.

$$h_e = h \left[\frac{E_1(1 - \mu_2^2)}{E_2(1 - \mu_1^2)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

kus (28)

h – kandva kihi paksus

E_1 – kandva kihi elastsusmoodul

E_2 – aluspinnase elastsusmoodul

μ_1 – kandva kihi Poisson'i tegur (vaikimisi kasutatakse 0,35)

μ_2 – aluspinnase Poisson'i tegur (vaikimisi kasutatakse 0,42).

Maksimaalne vertikaalne vastupanu aluspinnal σ_c asub rehvist tulenevast ringkoormusega koormatud ala keskel ja väljendatakse valemiga:

$$\sigma_c = p \left[1 - \frac{h_e^3}{(a^2 + h_e^2)^{1,5}} \right] \quad (29)$$

kus

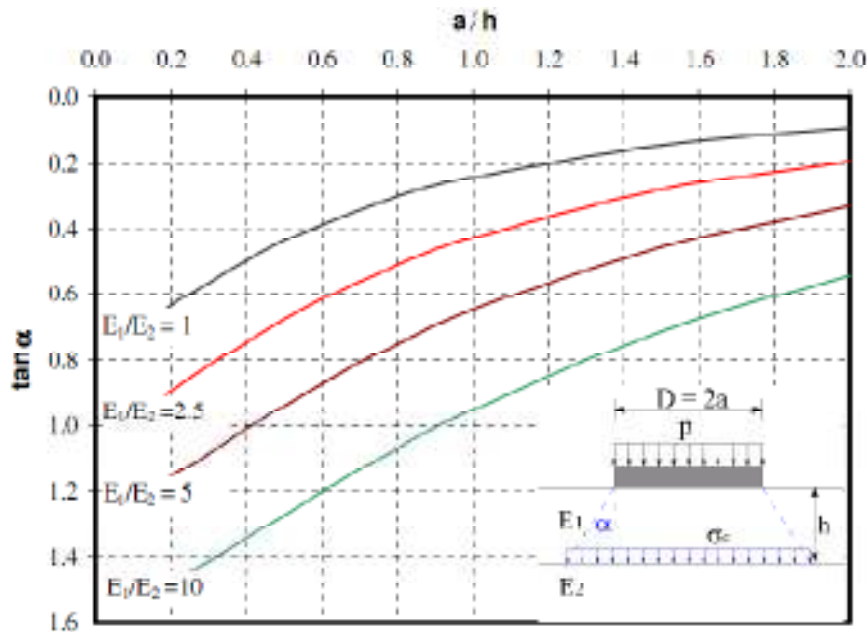
a – ringkoormusega koormatud ala raadius

p – koormuse suurus.

Maksimaalset vertikaalset vastupanu aluspinnasele (koormatud ala keskel) saab tinglikult ühtlaselt laiali jaotada pingegaotusnurga α abil. Ringkoormusega koormatud ala puhul, $\tan \alpha$ saab välja arvutada läbi kandva kihi paksuse (h) ja maksimaalse vertikaalse pinge mõõdetuna aluspinnaselt (σ_c):

$$\tan \alpha = \frac{a}{h} \left(\sqrt{\frac{p}{\sigma_c} - 1} \right) \quad (30)$$

Joonis 21 demonstreerib $\tan \alpha$ väärtusi kahekihilise elastse süsteemi puhul, kui muutuvad moodulid (E_1/E_2) ja kihipaksused (a/h).



Joonis 21. Koormusjaotusfaktor $\tan \alpha$ kahakihilise süsteemi puhul.

6.4.2. Kandva kihi lagunemine

Põhinedes vertikaalsetele pingetele aluspinnas teostatud plaattestidest, tagasiarvutatud $\tan \alpha$ näitab, et kandva kihi pingesuutvõime väheneb koos koormamistsüklite (telgede ületused) arvuga ja geovõrk paigaldatuna kandva kihi ja aluspinnase vahele suudab vähendada esimese omaduste nõrgenemist. „Lagunemiskoeffitsent“ $\tan \alpha(\lambda_2)$ valemi kujul on:

$$\lambda_2 = \frac{\tan \alpha_N}{\tan \alpha_1} = \frac{1}{1 + k_2 \log N} \quad (31)$$

kus

α_N – koormusjaotusnurk pärast N teljeületuste arvu

α_1 – esialgne koormusjaotusnurk

k_2 – konstant. k_2 on soovituslik suurus $\tan \alpha$ vähenemise juures.

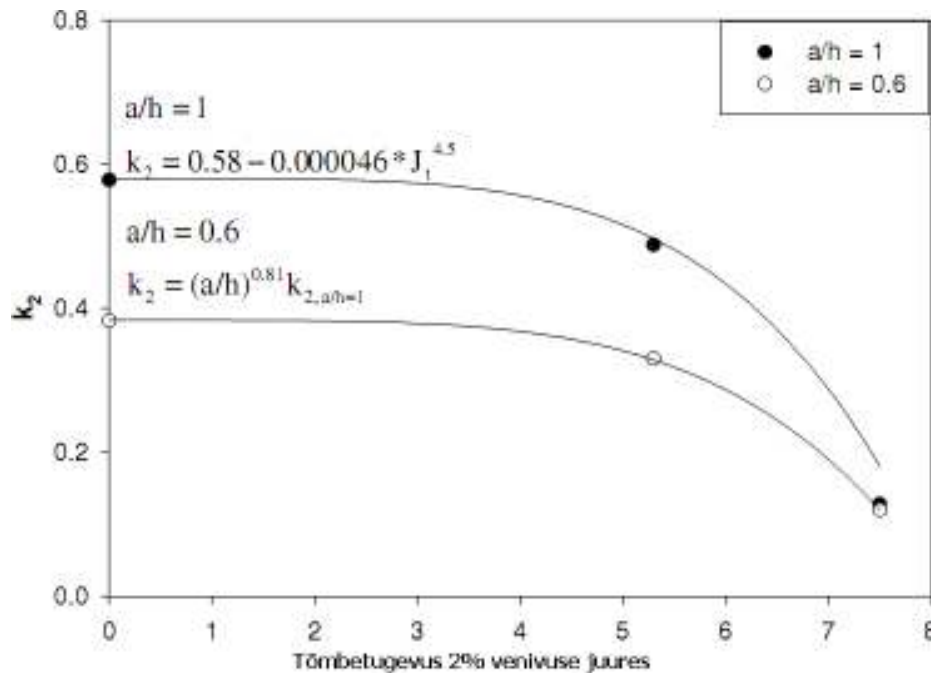
Geovõrkudega armeerimine parandab siirdekateenditega teid läbi jämedateralise (kruusa või killustiku) materjali lukustamise juba väikeste nihkepingete juures. Kandva kihi materjali terakesed tungivad geovõrgu avadesse ja lukustuvad seal. Nihkejõud kantakse nii kandvalt kihilt edasi geovõrgu teega risti olevatesse ribidesse ning läbi võrgu sõlmede (ehk sõlmed peavad olema suutelised vastu võtma suuri jõudusid – nad peavad olema jäigad ning tugevad) ka paralleelsetesse ribidesse. Giroud kasutas siirdekateendiga teedel tõmbejäikust 2% venivuse juures. „Lagunemiskoeffitsent“ k_2 on empiirilisel seadud 2% venivuse juurde järgnevalt: (kuigi katsetused näitavad natuke väiksemat väärtust)

(32)

kus

J_t – keskmine (masinasuunalise ja ristisuunalise tõmbe puhul – MD ja TD/XMD) tõmbetugevuse väärtus saavutamaks 2% venivust;

Kui $a/h = 1$, on miinimum k_2 väärtuseks seadud 0,15.



Joonis 22. Geovõrgu mõju lagunemiskoorile k_2

6.4.3. Potentsiaalne kandevõimefaktor

Geosünteedid paigaldatuna kandva kihi ja aluspinnase vahele suudavad suurendada aluse kandevõimet. Giroud ja Han (2004) tegid kokkuvõtte teoreetilistest kandevõimefaktori väärtuste suurustest telgsümmeetriliste juhtude puhul (axi-symmetric condition). Antud projekteerimismeetodi puhul on kasutatud $N_c = 3,8$ armeerimata teede puhul ja $N_c = 6,0$ geovõrguga armeeritud aluste puhul.

„Varutud“ ehk teistmoodi väljendatuna potentsiaalse kandevõimefaktori (m) all mõistetakse siin aluspinnase potentsiaalse vastupanuvõime funktsiooni kandva kihi paksuse ja roopasügavuse vahel. Staatiliste koormuskatsetuste tulemusel on kandevõimesuhte leidmiseks ligikaudne valem:

$$m = N_{cm}/N_c = 1 - e^{-0,78(a/h)} \quad (33)$$

kus

N_c – aluse kandevõimefaktor;

N_{cm} – aluse „varutud“ (potentsiaalne) kandevõimefaktor;

Arv „1“ on potentsiaalse kandevõimefaktori suurim väärtus. Nagu varem selgitatud, ei saa ta konstruktsioonis kunagi olla üks.

Siirdekategoriga teedel dünaamilise koormuse all on tavaliselt lubatud roopa teke sügavusega vahemikus 0,05 – 0,10 m. Antud projekteerimismeetodis on oletatud, et aluse täielik potentsiaalne kandevõime kasutatakse ära siis, kui tema deformatsioon on 0,038 m peale ühte koormustsüklit (teljeületus) ja 0,05 m peale 10000 koormustsüklit. Seda nimetatakse kriitiliseks aluse deformatsiooniks (r_{cr}) ja ta on seotud koormustsüklite arvuga järgnevalt:

$$r_{cr} = 0,025 \times (0,125 \log N + 1,5), \text{ m} \quad (34)$$

Aluse potentsiaalset kandevõimefaktorit saab siduda lubatud projekteeritud roopa sügavusega (r) järgnevalt:

$$(35)$$

$$m = \left[1 - e^{-0,78\left(\frac{a}{h}\right)} \right] \frac{r}{r_{cr}} \leq 1$$

Potensiaalse kandevõimefaktoriga „parandatud“ kandevõimefaktori valem on:

$$q_{cm} = mN_c C_u \tag{36}$$

kus

C_u – aluspinnase dreanimata nihketugevus.

6.4.4. Projekteerimislahendus

Nagu algselt Giroud ja Noiray (1981) poolt esitatud lahendis tooduga, vertikaalne pinge alusel peab olema väiksem või võrdne potentsiaalsest kandevõimest vältimaks liiga suurte roobaste tekkest tulenevat teenindustaseme langust. Tasakaaluvõrrand on:

$$\sigma_c = \frac{P}{\pi(a + h \tan \alpha_N)^2} \leq m N_c C_u \quad (37)$$

kus

σ_c – vertikaalne pinge aluse pealt mõõdetuna;

P – ühe ratta koormus;

a – koormatud ala raadius;

α_N – koormusjaotusnurk projekteeritud koormustsüklitele N;

m – potentsiaalne aluse kandevõime;

N_c – aluse kandevõimefaktor (3,8 armeerimata alusele, 6,0 geovõrguga armeeritud alusele);

C_u – aluspinnase dreanimata nihketugevus.

Kandva kihi nõutud paksus arvutatakse valemiga:

$$h = \frac{1}{\tan \alpha_N} \left(\sqrt{\frac{P}{\pi m N_c C_u}} - a \right) \quad (38)$$

Oletades, et rattakoormus jaguneb ühtlaselt kontaktpinnale ($P = p\pi a^2$) ja kandva kihi lagunemist saab määrata kui $\tan \alpha_N = \tan \alpha_1 (1 + k_2 \log N)$ on kandva kihi paksuse arvutamiseks valem:

$$h = \frac{a(1 + k_2 \log N)}{\tan \alpha_1} \left(\sqrt{\frac{P}{m N_c C_u}} - 1 \right) \quad (39)$$

Kuna h või a/h (m' i leidmise valemist) asetsevad valemis mõlemal pool võrdusmärki, tuleb kasutada iteratsioonimeetodit⁵ leidmaks h . Nõutud kihipaksus selles valemis on funktsioon, mis koosneb kandva kihi-aluse moodulite suhtest (E_1/E_2), aluspinnase dreenimata nihketugevusest, geovõrgu tõmbetugevusest 2% venivuse juures, kandevõimefaktorist (N_c), ühe ratta koormusest (P), koormatud ala raadiusest (a) ja projekteeritud koormustsüklitest (N).

6.4.5. Projekteerimissuurused

Aluspinnase ja kandva kihi juures kasutatakse maailmas laialdaselt CBR-arvu. Pea kõik projekteerimismeetodid geovõrkudega nõuavad seda suurust, kas siis kaudselt või otseselt. Järgnevalt on toodud seosed dreenimata nihketugevuse ja kihtide moodulite vahel. Aluse dreenimata nihketugevuse seos mooduliga on (Giroud ja Noiray 1981 pakutud variant):

$$C_u = 30\text{CBR}_{sb} \quad (40)$$

Muud seosed elastsusmoodulite ja CBRi vahel on toodud peatükis 6.2.1. ning lisas.

6.4.6. Kalibreerimine ja limiteeringud

Eespool kirjeldatud teoreetilised alused on tuletatud laboratoorselt tsüklilise plaattesti tulemil telgsümmeetrilises situatsioonis. Et valemit kasutada reaalsel tee-ehitusobjektidel, tehti katsetused ja leiti kalibreerimisfaktor 0,8, mis tuleks lisada paremale poole valemist:

$$h = \frac{0,85a(1 + k_2 \text{Log}N)}{\tan\alpha_1} \left(\sqrt{\frac{P}{mN_c C_u}} - 1 \right) \quad (41)$$

Katsetused tehti Tenax geovõrkudega.

⁵ Ülesande järk-järguline lahendamine. Antud juhul oletatakse kihipaksus ning arvutatakse, kuni vajalik paksus on käes.

Arvutusmeetodi limiteeringud on:

- meetod on spetsiaalselt välja töötatud ekstruuderdatud kahesuunalistele polüpropüleenvõrkudele;
- projekteeritud roopasügavus jääb vahemikku 0,05 – 0,15 m;
- aluspinnase CBR-arv on väiksem või võrdne 4;
- geovõrgu tõmbetugevus 2% venivuse juures on väiksem või võrdne 10 kN/m;
- ehitamisel minimaalne kandva kihi paksus võib olla 0,10 m roopasügavuse 0,075 m või väiksema juures ning 0,15 roopasügavuse üle 0,075 m juures.

6.4.7. Arvutamine

Samm 1. Projektsuuruste ettevalmistus:

- aluspinnase CBR või dreanimata nihketugevus (C_u);
- kandva kihi CBR;
- geovõrgu tõmbetugevus 2% venivuse juures;
- koormused (P - pool teljekoormusest) ja rehvisurve (p);
- teljeületuste arv (N) ja roopa sügavus (r);
- kontaktala raadius;
- kandva kihi ja aluse elastsusmoodulid (vastavalt E_1 ja E_2).

Samm 2. Aluse kandevõime kontroll:

- aluse kandevõime arvutamine ($q_c = N_c C_u = 3,8 C_u$);
- aluse kandevõime võrdlemine rattakoormusega (p): kui $p > q_c$, minnakse edasi kolmanda sammuga; kui $p \leq q_c$, arvutus lõpeb siin.

Samm 3. Vajaliku kihipaksuse arvutamine:

- kõigepealt tehakse oletus kihipaksuse peale (h);
- määratakse valemitega 28, 29, 30 või joonise 21 abil $\tan \alpha_1$;

- arvutatakse $\tan \alpha_N = \tan \alpha_1(1+k_2 \log N)$;
- arvutatakse potentsiaalne kandevõime (m) valemiga 35;
- arvutatakse vajalik kandva kihi paksus (h_{cal}) valemiga 41;
- kui $h \neq h_{cal}$, oletatakse, et $h = h_{cal}$ ja korratakse arvutuskäiku; kui $h = h_{cal}$, arvutus lõpeb siin;
- võrreldakse nõutavat kandva kihi paksust arvatud kandva kihi paksusega.

7. GEOSÜNTEETIDE PAIGUTUS JA KASUTUS

Armeerkihtide paigutuskoha konstruktiooni määravad toote kasutuseesmärk, aluspõhja omadused ning koormuse suurus. Üldiselt võib öelda, et näiteks külmakergete mõju vähendamiseks oleks parim koht võrgule võimalikult konstruktiooni ülaosas. Muldkeha tugevdamise puhul, näiteks vajumisest tulenevate kahjude minimeerimiseks oleks parim koht võrgule võimalikult all konstruktioonis. Sellistel juhtudel võtavad võrgud tõmbejõud kõige paremini vastu. Koormustaluvust silmas pidades, võrgu asukoht ei pruugi olla tingimata üks eelpoolmainitustest. Lõplikku asukohavalikut valides lähtutakse võrgu primaarfunktsioonist, sellest mida tahetakse eelkõige saavutada.

Mitmetes uuringutes, milles käsitleti kasutuspiirseisundit (roopa teke ja sügavus) ning konstruktiooni eluea pikendamist leiti, et geosünteeet (võrk) annab parimaid tulemusi asettedes ta 200 – 300 mm paksu kandva kihi (killustiku) all. Paksemate kihtide puhul oleks parimaks kohaks umbes kihi keskel. Mainitud kohtadel leiti geovõrgu toimivus olevat parim.

Asetades võrk killustikukihi alla, liiva peale, oleks mõistlik teha seda koos tekstiiliga. Kui vahel pole separeerivat kihti, hakkavad liivaterad tungima killustikuterade vahele, seda eriti dünaamiliste koormuste all. Antud nähtus hakkab vähendama nende omavahelist hõõret ja kandevõime väheneb. Võrgu eelis antud konstruktioonis seisneb selles, et tekstiil peab täitma vaid separeerimisülesannet, ehk saab kasutada odavamaid tekstiile, sest tõmbepinged võtab vastu võrk. Samuti geovõrk toimib kui lukustaja, mis ei lase killustikuteradel laiali vajuda, tänu sellele konstruktioon suudab võtta paremini vastu nihkepingeid. Mingil määral suudab võrk lukustada ka liiva, eriti koostöös tekstiiliga. Liiva puhul on geovõrgu paksus ja ribide kuju väga oluliseks teguriks, kuna liivaosakesed on väikesed ja nad liiguvad üksteise suhtes kergemini kui killustikuterad, seega vajab liiv suuremat toetuspinna võrgu ribidelt kui killustik. Tensar on suutnud oma geovõrkude ribid teha kandiliseks ja kõrgemaks, mis tagab parema lukustuse just kokkupuutes liiva või muu peeneteralise materjaliga (joonis 23).



Joonis 23. Võrgu ribide efektiivne geometria

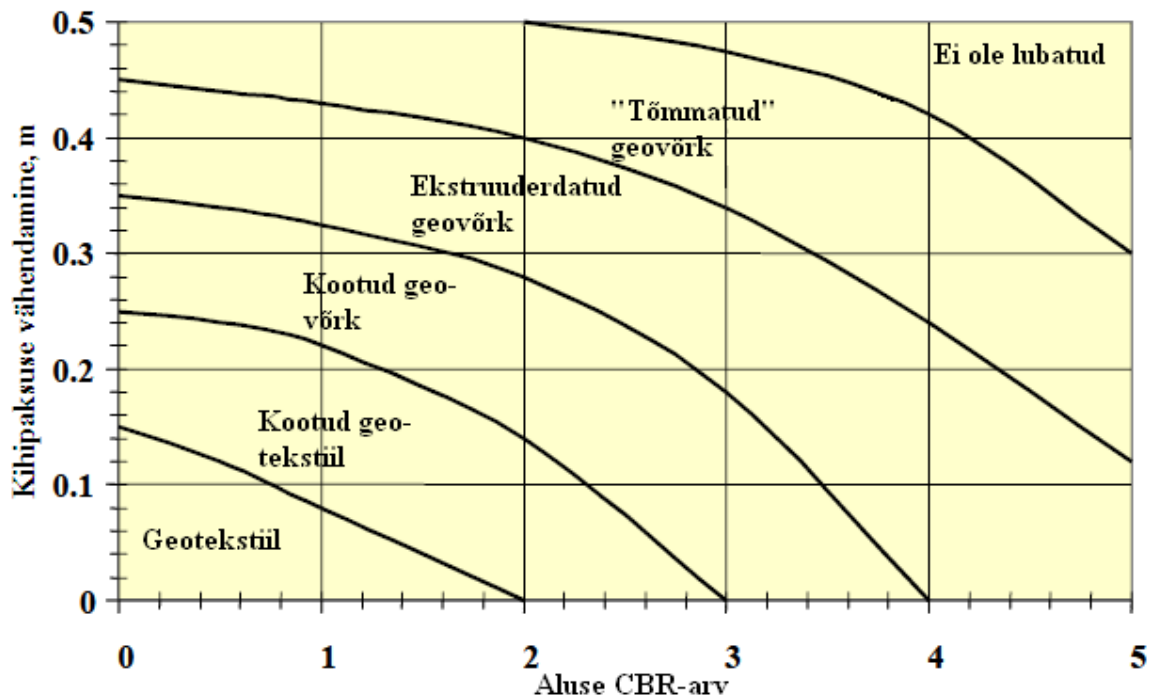
Kui geosünteedide eesmärgiks on ühtlustada või vältida vajumisi, tuleb nad paigutada võimalikult sügavale konstruktsiooni alla. Kui aluspinnas hakkab erinevalt vajuma, ei lase tekstiil liival kaasa vajuda (või nõrga aluspinnase materjalidel ülespoole tungida) ning võrk rakendub tööle tõmbele. Näiteks kui on vaja ületada potentsiaalset nõrka kohta või kus on oht, et aluspinnases on tühimikke, mis võivad aja möödudes järgi anda, siis oleks aluse peal kõige kindlam kasutada tekstiili ja võrgu komposiiti. Võrgus tekkivad tõmbepinged ei lase konstruktsioonil vajumiga kaasa minna, samal ajal kui tekstiil takistab liiva vajumist aja jooksul (kas vee või dünaamilise koormuse toimetel) läbi võrgu avade ja etendab nii rolli konstruktsiooni püsimises. Kuna koormuse all on tekstiil ja võrk üksteise vastu tihedalt surutud, ei teki ohtu, et osakesed siiski läheksid läbi võrgu ja raskuse tõttu purustaksid tekstiili. Läbi tihendamise surutakse ka liivaosakesed (sarnaselt killustikule) tugevasti vastu võrgu ribisid takistades nende külgsuunalise liikumise, eriti kui võrgu geometria toetab ka liiva efektiivset lukustamist. Liiva nihkeid takistab ka veel geotekstiiliga kaasnev hõõrdejõud.

Ühe USA ettevõtte (US Fabrics), mis tegeleb geotekstiilide, -võrkude ja -membraanidega, poolt läbi viidud uuringu käigus võrreldi omavahel võrke ja tekstiile. Nad väidavad, et geotekstiilid on tugevad ning suureks eeliseks võrkude ees on nendel eraldamisfunktsioon. Võrgud tuginevad eelkõige lukustussüsteemile, kus pinnase või killustiku terad lukustuvad paika selle avadesse. Tavalised pinnasevõrkude ava mõõtmed on vahemikus 25 – 40 mm (ühe külje pikkus kas nelinurk- või kolmnurkvõrgul). Väga tähtis on, et materjaliosakesed oleksid õiges mõõdus lukustumaks täielikult võrgu struktuuris. Kui pinnaseosakesed on kas liiga suured, väikesed või varieeruvad suuresti, võib juhtuda, et lukustus pole nii ulatuslik kui oli projekteerimisel arvestatud. Seetõttu antud uurimise koostajad soovivad kasutada vahetus kokkupuutes pehmete, peeneosaliste ja liigniiskete pinnaste puhul tekstiile – nad ei lase pinnastel seguneda ning toimivad ka kui drenkihina juhtides tee pinnast sisse imbunud vee konstruktsioonist välja laskmata sel jõuda aluspinnasesse seda veel nõrgestama. Samuti tekstiili ja näiteks liiva vahel on väga head hõõrdetakistusomadused, mis toimivad tekstiiliga

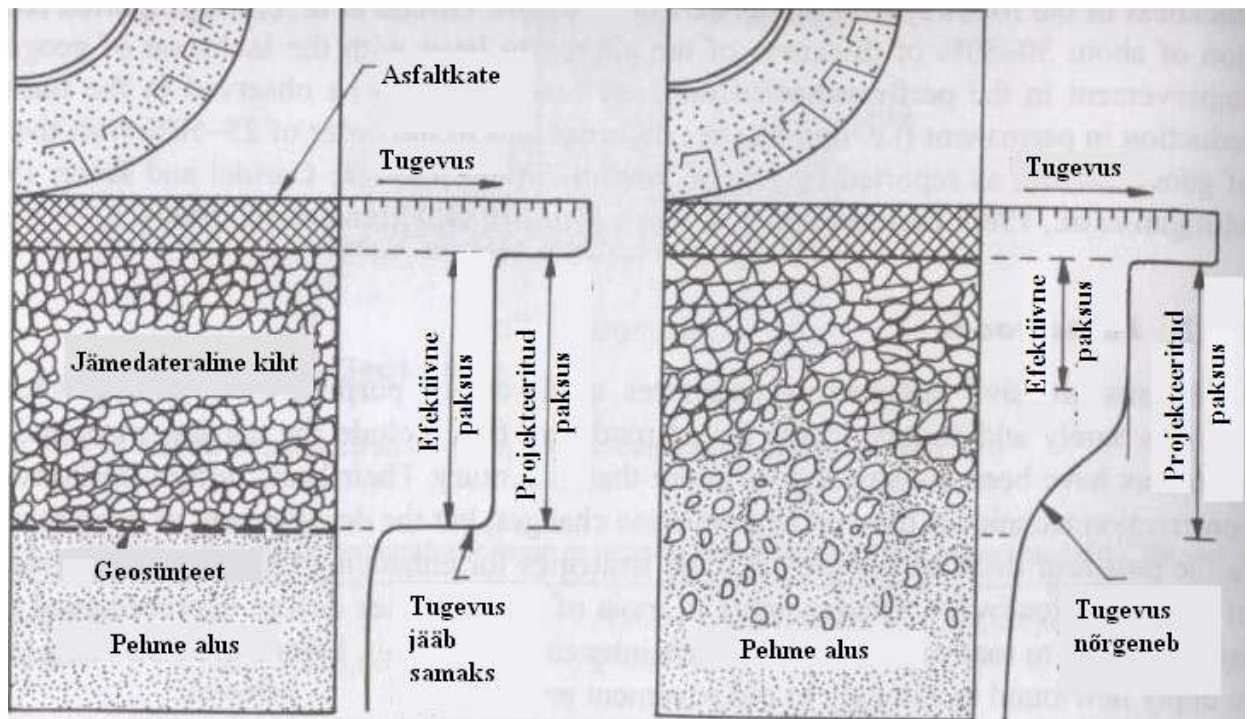
kokkupuutes oleval alal kui lukustusmehanism. Antud ettevõtte soovib kaaluda võimalusi kasutada ka ainult tekstiile ilma võrkudeta. [21]

Alati peaks toimima vastavalt olukorrale objektil. Antud firmal (US fabrics) on kindlasti mängus ka omad ärilised kasud, sest nemad tegelevad laialdaselt just geotekstiilidega. Mõnes mõttes on neil õigus, aga, nagu teistegi firmade poolt tehtud avaldustega, tuleks olla ettevaatlik, kuna nendega edendatakse eelkõige endi ärilisi huve.

Võrkude tootjad propageerivad tugevalt nende toodete kasutamist, kuid alati ei ole see majanduslikult kõige otstarbekam. Kõik sõltub objekti iseloomust ja antud nõudmistest. Enamik uuringuid ja kõik teoreetilised arvutusmeetodid näitavad võrkude selget eelist tekstiilide ees kui tegemist on kihipaksuste vähendamisega (joonis 24). Siiski, nagu eespool kirjeldatud, ei etenda teatud kihipaksuste juures enam võrgud mingit erilist rolli välja arvatud lisagarantii saamine teenindustaseme tagamisel. Eesti tingimustes on väga oluliseks teguriks külmakindluse tagamine. Selleks peab tee pealmine pind olema kõrgemal pinnasevee tasemest vähemalt külmumissügavuse võrra. Samuti peab muldkeha olema ehitatud külmakerkekindlatest materjalidest, mis teatavasti on kõik hea elastsusmooduliga ja seetõttu hea kandevõimega. Sellistes olukordades pole vaja suurendada tee kandevõimet ega saa ka vähendada mulde kõrgust läbi kihipaksuste vähendamise. Siin oleks hea kasutada tekstiile takistamiseks erinevatel kihtidel omavahel seguneda (jällegi oleneb hinnast, saab kasutada ka võrke), seeläbi suureneb konstruktsiooni kandva osa efektiivsus (joonis 25).



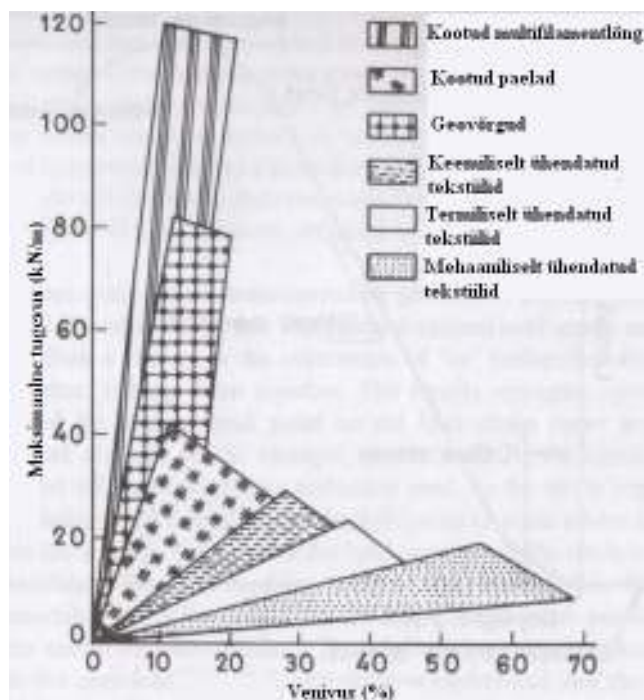
Joonis 24. Erinevate geosünteedide võrdlus



Joonis 25. Geosünteedilistest materjalidest tulenev kasu [13]

Teine olukord on juhul kui näiteks on teada läbi geoloogiliste uuringute, et alusinnase kandevõime varieerub suuresti ja väljakaev oleks liialt mahukas, siis võib mõelda jäikade pinnasevõrkude

kasutamisele eespool kirjeldatud tööpõhimõtete tõttu. Samuti jäikadel ekstruuderdatud võrkudel on suur tasapinnaline stabiilsus ning sõlmede tugevus on suur – pinnaseosakesed lukustuvad ega lähe liikuma ning teel ei saa tekkida suuri vajumeid. Ka on jäikadel võrkudel suhteliselt väikesed venivusomadused (joonis 26). Kuna nad võtavad vastu osa nihkepingetest, mis muidu võiksid tekkida pinnases, on väiksem oht aluse lihkumisele ja seeläbi tee deformeerumisele.



Joonis 26. Erinevate geosünteesiliste materjalide venivusomadused [13]

Üheks näiteks vajumiste ühtlustamisest geovõrkudega võib tuua Inglismaal tee A66 rekonstreerimisprojekti, kus laiendati kiirteed ja ristmikke. Ühe ristmiku laienduse alla jäi osa vanast 7 m sügavusest kaevandusest, mis on täidetud väga halbade omadustega täitematerjaliga. Algselt pakuti lahenduseks kõik välja kaevata ja asendada uue kvaliteetse materjaliga. Kuna töö oleks osutunud äärmiselt kalliks ja ka keskkonnaohtlikuks, otsiti teisi võimalusi. Tensar pakkus välja lahenduse kasutamaks jäikaid geovõrke. Ehitatigi TriAx võrguga mitmekihiliselt armeeritud killustikalus. Tänu sellele suudeti säästa vähemalt 75% sellest maksumusest, mida pakuti kõigepealt ning seda väga aksepteeritava riskiastme juures. [15: 58]

Pidades silmas jäikade geovõrkude häid omadusi, on käesoleva lõputöö autor seisukohal, et nende kasutamine Eestis peaks olema oluliselt suurem. Kõige lihtsam kasutusvaldkond oleks kruusateede ja ajutiste teede ehitamine. Need teed pole nii tundlikud külmakergetele, on vaid vaja tagada tee piisav kandevõime, seda eelkõige väga niisketel aastaegadel. Nagu projekteerimismeetodite ülevaates oli

näha, arvutamisel ongi silmas peetud olukorda, kus aluspinnas on dreanimata ehk suure niiskusesisalduse tõttu väikese kandevõimega. Sellistel juhtudel on eelkõige vaja, et miski hoiaks kandva kihi osakesi alusesse vajumast ning samaaegselt külgedele väljavajumist. Samuti on väga oluline takistada roobaste teket veoautode poolt, et tee säiliks sõidetavana ka väikestele sõidukitele ning tee ei vajaks peale igat kevadist suurvett suurt remonti.

Jäikadel geovõrkudel võiks olla suurem roll ka kattega teede ehitusel, Eesti tingimustes üheks olulisimaks kasutuseesmärgiks nendele oleks teekonstruktsiooni eluea tõstmine. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend näeb ette, et püsikatendid projekteeritaks vähemalt 15 aastale. Kogemused on näidanud, et erinevate tegurite koosmõjul (eelkõige ilmastik) niikaua teed meil vastu ei pea. Geovõrgud suudavad anda konstruktsioonile lisatuge ja seetõttu suurendada kindlust, et tee peab edukamalt vastu kui siia maani on pidanud. Samuti saab neid edukalt kasutada tühimike ületamisel, näiteks rajades teed üle Ida-Virumaal asetsevate vanade kaevanduste, kus geovõrk võtaks aluse varisedes enda kanda tee raskuse ja hoiaks ära selle kohese purunemise tagades nii ohutuma liiklemise. [1: 8; 3: 15]

Suureks kasutusvaldkonnaks jäikadele geovõrkudele Eestis oleks veel teede ehitamisel üle pehmete alade. Eesti pindalast moodustavad sood 22,3% [22], mis jääksid vanade teede õgvendamisel või uute teede ehitamisel paratamatult kuskil ette. Pehmete pinnaste peale ehitamisel on põhiprobleemiks ebaühtlased vajumised ja sellest tulenevad teekatte suured ebaühtlused. Kõige hullematel olukordadel võivad teekonstruktsioonid pehmesse pinda täielikult sisse vajuda. Geovõrgud koos -tekstiilidega aitavad ühtlustada vajumeid ning läbi koormusjaotusnurga suurenemise tugevdavad kaudselt ka aluspinda. Kasutades geovõrke ja -tekstiile saab ehitada üle pehmete pinnaste „ujuvaid sildu“, kus konstruktsioonikihte hoiavad omavahel nihkumast jäigad geovõrgud tänu oma lukustusomadustele, ning geotekstiilid takistavad pehmel pinnasel tungida konstruktsioonimaterjali sisse tagades seeläbi kvaliteetse ehitusmaterjali omaduste säilimise. Teekonstruktsioon vajub kogu ulatuses ja ühtlasemalt pehme pinnase järeltihenemise arvelt.

8. ARVUTUSMEETODITE KASUTUSVÕIMALUSED EESTIS

Arvutusmeetodite põhimõtteid saaks edukalt kasutada koos Eestis kasutusel oleva katendiarvutusmeetodiga. AASHTO meetod ongi tehtud viisil, kus kõigepealt arvutatakse välja tavapärase vajaminev katendi paksus ning siis vähendatakse seda teguri võrra, mis on saadud katsetuste tulemusel. Kuid mõõtmismeetodid ja erinevate pinnaste materjalide käsitus on üle maailma niivõrd erinev, et üks-ühele samamoodi projekteerida ei saa. Kui näiteks USAs kasutatakse väga palju CBRi arvu, mis mõõdetakse laboris või plaattestimisega objektil, siis Eestis selline katsetus siamaani ametlikult kasutuses ei ole. Samuti on erinevad elastsusmooduli väärtuse mõõtmised ning ka selle käsitus on natuke erinev. Kasutades täpselt neid arvutusmeetodeid, mida kasutatakse maailmas ning siis võrrelda saadud tulemusi meie katendiarvutusmeetodi tulemustega, on näha, et asjad ei klapi omavahel.

Suured vahed pinnaste elastsusmoodulite vahel tulevad sisse juba Eestis sees tehtavate katsetuste ja arvutustulemuste võrdlemisel. Teelehes september 2004 artiklis „Euroopa pinnaste klassifikatsiooni kasutamine katendite dimensioneerimisel“ on välja toodud tõsiasi, et Eesti Keskkonnauuringute Keskuse geotehnikalabori poolt arvutatud elastsusmooduli (E) väärtuste erinevused on Elastsete teekatendite projekteerimise juhendi 2001-52 väärtustega võrreldes ligi kolmekordsed. Sellel puhul töötati küll välja valem nende omavahelise seose leidmiseks. Samamoodi ei saa võrrelda ka FWD-mõõtmistest saadud tulemusi, kuna erinevad väärtused tekivad juba sellest, kui näiteks koormamise aeg on erinev rääkimata siis veel plaadi suuruse varieerimisest tulenevatest erinevustest. Ka USAs kasutatakse FWD-mõõtmisi, kuid mõõtetehnoloogia on erinev ja sealt tulevad sisse vahed. Meie materjalide elastsusmoodulite väärtusi ei saa isegi võrrelda Soome omadega rääkimata siis veel kaugemate maade omadest. [4]

Järgnevalt on toodud väljavõtte 2004 „Teelehest“, kus räägiti FWD-mõõtmise eripäradest ja varieerimisvõimalustest:

„FWD on otstarbekas vahend katendi struktuurse käitumise kirjeldamiseks, sest seade simuleerib seni kasutatutest kõige täpsemini liikluskoormuse mõju katendile ja mõõtmistulemused annavad koormusele vastava vajumikausi kuju.

Katendi üldise elastsusmooduli arvutamiseks kasutatakse Eestis praegusel hetkel ainult dünaamilise koormusseadme (FWD) 0-anduri (langeva raskuse keskmes oleva anduri) lugemit, mille alusel on võimalik arvutada katendi kevadine üldine elastsusmoodul, kasutades selleks A. Aaviku doktoritöös ”Teekatendite tugevuse hindamise meetodilised alused Eesti teekatendite hoiu süsteemis (EPMS)” 2003.a. leitud võrrandit.

FWD mõõteseade: Koormusimpulss tekitatakse teatud massiga raskuse kukutamisel 300 mm läbimõõduga ümmargusele koormusplaadile kinnitatud vedrusüsteemile (kummipuksidele). Tekitatava koormuse suurust ja kestust on võimalik varieerida langeva massi ja selle langemise kõrguse muutmisega. Erinevad FWD seadmed võimaldavad rakendada koormusi 4,45 kN - 156 kN ja koormusimpulsi kestust 30 – 90 ms.

Katte läbipainet mõõdetakse piki teed reas paikneva 7 kuni 9 anduriga, millest üks paikneb koormusplaadi tsentris ja ülejäänud teatud kaugustel esimesest. Eestis kasutatav andurite asetus on alates koormusplaadi keskmest järgmine: 0, 300, 600, 750, 900, 1200 ja 1500 mm. Mujal maailmas soovitatakse kasutada andurite teistsuguseid asetusi.”[14: 13]

Kuigi on välja toodud mõningad valemid üleminekul näiteks CBRilt elastsusmoodulile, ei saa ka nendes päris kindel olla, sest USAs näiteks kasutatakse samade materjalide puhul natuke erinevaid elastsusmooduleid. AASHTO katendiarvutusmeetodis tuleb leida kihitegureid läbi materjalide kandevõimeomaduste, kuid kui need ei klapi, ei tule ka arvutused piisavalt usaldusväärsed.

Iga tootja on ise oma toodete jaoks välja töötanud läbi katsetuste selle teguri, kuidas see hakkab tööle ja siis pannud selle arvutuste sisse teatud numbritega (nt. LCR või N_c). Kindlasti kõikide toodete uuesti katsetamine ja vastavusse viimine meie arvutusmeetoditega on mõeldamatu, kuid oleks võimalik kontrollida näiteks teatud võrke ja siis võrrelda, kas saadud tulemused ja tootja poolt välja antud

arvutusmeetodid on omavahel vastavuses. Eeltööna peaks kindlaks tegema, kuidas tootjad on oma katselõigud ehitanud, mis tingimustel ja kuidas on tulemusi mõõdetud.

Tänaseks päevaks on ehitatud lõike kasutades jäikaid augustatud ja tõmmatud geovõrke nii maanteedel kui kõrvalteedel, samuti ajutiste teede ehitusel. Kui on teada piisavalt andmeid – kui suur on liikluskoormus, mis pinnastega on tegu, millised on hüdrogeoloogilised tingimused, millised olid projekteerimisalused, kuidas lõiku ehitati ja mis tooteid kasutati – saab juba sellistelt lõikudelt palju kasulikke andmeid järeldamiseks, kas ja kuidas on geovõrgud täitnud oma ülesandeid.

Kõige paremini saab võrrelda, ühildada ja kalibreerida projekteerimismeetodeid ehitades spetsiaalseid katselõike kohtadesse, kus looduslikud tingimused lõigu pikkuses praktiliselt ei muutu. Üks lõigu osa peaks olema armeerimata, teised lõigud erinevate geovõrkudega armeeritud ja parimal juhul oleks ka lõike, kus on kasutatud erinevaid arvutusvõtteid.

Kuna arusaamad materjalide omadustest on väga erinevad, tuleks enne ehitama hakkamist võtta pinnaseproovid viisil, mida nõuab projekteerimismeetod. Näiteks tuleks katselõigul mõõta pinnaste CBR-arv, samamoodi ka kasutatavate ehitusmaterjalidega, mitte üritada neid teisendada elastsusmoodulitest. Kuna kattega teede puhul on hetkel kasutatav vaid AASHTO katendiarvutusmeetod, mis nõuab kihitegurite ning struktuuriarvu määramist, mis võetakse nomogrammidele, on pinnaste parameetrite mõõtmine õigete tulemuste saamiseks väga oluline.

Kõik projekteerimismeetodid maailmas on välja töötatud ja kalibreeritud katselõikudel põhinevalt. Seda peaksime tegema ka meie, et ühildada olemasolevaid või koostada oma katendiarvutusmeetod geovõrkudele (geosünteedidele). Teine võimalus on muuta kogu Eesti katendiarvutusmeetodit võttes üle mõne muu riigi juba kasutusel olev analoog, mis sobib meie oludesse kõige paremini ja kus on sees ka juba geosünteedide arvutus. Maailmas aksepteeritakse juba ammu geovõrke, kasutatakse neid aktiivselt ehituses ja katendiarvutuses ning nad on leitud olevat väga kasulikud. Sama lugu peaks olema ka Eestis.

9. KOKKUVÕTE

Antud töö eesmärk oli tutvustada põhimõtteid, mis käsitlevad katendi arvutamist geovõrkudega, nii elastseid kui siirdekatendeid, ning vaadelda üldiselt tegureid, mida peab arvestama projekteerimisel. Samuti vaadelda, kas maailmas esinevaid arvutusmeetodeid saaks ka Eestis täiel määral kasutada.

Töö eesmärgid said täidetud. Antud lõputöös on käsitletud erinevaid tegureid ja omadusi, mida projekteerija peaks silmas pidama. Samuti käsitletakse põhilisi teoreetilisi alused, mille põhjal tootjad on oma arvutusmeetodid üles ehitanud. Märkuseks võib öelda niipalju, et enamused teooriad ja arvutusmeetodid on välja arendatud USAs ning Euroopa on need lihtsalt üle võtnud. Eestis kasutatakse hetkel enamasti samadel, töös kirjeldatud alustel, põhinevaid arvutuskäike. Samuti on väga laialdaselt levinud nomogrammidel põhinevad kihipaksuse vähendamise arvutused.

Antud lõputöö tulemusel on näha, et üks-ühele olemasolevaid arvutusmeetodeid kasutada ei saa, kuna algandmete käsitus on teistsugune. Tuleb teha lisa uurimustööd katselõikude näol ja niiviisi üritada integreerida traditsioonilisse katendiarvutusse sisse ka geosünteeside osa.

Edaspidiseks töö edasiarenduseks tuleb teha erinevate arvutusmeetodite omavaheline võrdlus arvutustulemuste näol ning võrdlus ka vastavalt Elastsete teekatendite projekteerimise juhendile 2001-52 arvutatud armeerimata teede katenditega. Vajalik on ka vastavalt arvutustulemustele ehitada katselõike ning nende jälgimise tulemusena saab teha juba järgmised järeldused ja edasised sammud. Kuna Eesti oludes on määrama tähtsusega külmakerke takistamine, tuleks uurida katselõikudega ka seda, kas jäigad geovõrgud suudaksid parandada seda olukorda.

10. SUMMARY

Geosynthetics are a concept for a certain group of materials. These are synthetic materials used in land and hydraulic constructions. There is a wide variety of geosynthetics in use that are meant for performing different functions in different building-constructions and their parts, including road building. In road building, they are used widely all over the world. In developed countries there are almost no roads without geosynthetic components. In Estonia first steps are still taken in the field of geosynthetic road building, however over 50 km of reinforcement geosynthetics has already been installed in the state roads.

This graduation thesis analyses the main criteria how to choose the right geosynthetic reinforcement for the future projects and how to calculate pavements in view of this. It seems that the main problem, why geosynthetics are not so widely used in road building is the lack of knowledge. Clients and contractors usually do not know how, for example geogrids are working and what benefits they can result. Some have seen dealers' promotional materials and based on that they know what should be the result of using geosynthetic materials. But only a few people know, what are the mechanisms how geosynthetics work and how the benefit coming out of them can be proved by calculations. It seems that because of the lack of sufficient knowledge it has not been allowed to use geosynthetic materials very widely.

As the result of this graduation thesis the working principles of geosynthetic reinforcement, calculation methods and steps which are commonly used by different manufactures and designers have been explained in depth. Also the thesis analyses if these calculation methods are useable in Estonia and which are the most important parameters to be considered if we want to apply them in our conditions.

To summarize, the purpose of this graduation thesis was achieved.

11. KASUTATUD KIRJANDUS

1. Elastsete teekatendite projekteerimise juhend 2001-52. 2001, Tallinn.
2. Geosüntetide kasutamise juhise. 2006, Tallinn, Maanteeamet.
3. Tee projekteerimise normid ja nõuded. 2000, Tallinn.
4. AL ST 1-02 Asfaldinormid. 2002, Tallinn.
5. Maanteede remondil geotekstiilide ja armeervõrkude kasutamine, lõpparuanne. 2008, Tallinn, AS Teede Tehnokeskus.
6. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. 1993, Washington DC. American Association of State Highway and Transportation Officials. ISBN 1-56051-055-2.
7. Archer S. 2008. Subgrade Improvement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids – CE News, Professional Development Hours.
8. Giroud J.P., Han J. 2004. Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. I. Development of Design Method – ASCE, August.
9. Giroud J.P., Han J. 2004. Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. II. Calibration and Applications – ASCE, August.
10. Tenax Design of Unpaved Roads With Tenax Geogrids, Technical Reference TDS007.
11. Tenax Design of Flexible Pavements With Tenax Geogrids, Technical Reference GRID-DE-2.
12. Tenax biaxial geogrids specifications.
http://www.tenax.net/geosynthetics/tender_specs/biaxial_geogrids.pdf
13. Shukla, S. K., Yin, Jian-Hua. 2006. Fundamentals of Geosynthetic Engineering, Taylor&Francis.
14. Aavik, A. 2004. Euroopa Pinnaste Klassifikatsiooni Kasutamine Katendite Dimensioneerimisel – Teeleht, nr 2(38), september.
15. World Highways. 2008. A Strong Combination. Nov/Dec.
16. Tie- ja Katurakenteiden Elinkaaren Pidentäminen Lujitteiden Avulla. LUPAV2 lõpparuanne. 2006.
http://www.vtt.fi/liitetiedostot/cluster6_rakentaminen_yhdyskuntateknikka/LUPAV_Raportti_hgr_viiimeist.pdf
17. Arvutusprogrammi „SpecrtaPave3“ tehniline juhend.

18. Arvutusprogrammi „TenaxRoadSW“ tehniline juhend.
19. Sukumaran, B. 2002. Suitability of Using California Bearing Ratio Test to Predict Resilient Modulus. <http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/att07/2002%20TRACK%20P.pdf/P-62.pdf>
20. Montanelli, F. Geosynthetic-Reinforced Pavement System: Testing and Design. http://www.tenax.net/geosynthetics/tech_doc/tds001.pdf
21. Woven Slit Film Geotextiles: A Highly Efficient and Cost Effective Alternative to Polypropylene Geogrids for Base Stabilization Applications. U.S. Fabrics. http://www.usfabricsinc.com/media/products/Woven_Slit_Films_Effective_Less_Costly.pdf
22. Orru, M. 1995. Teatmik: Eesti turbasood, Eesti Geoloogiakeskus

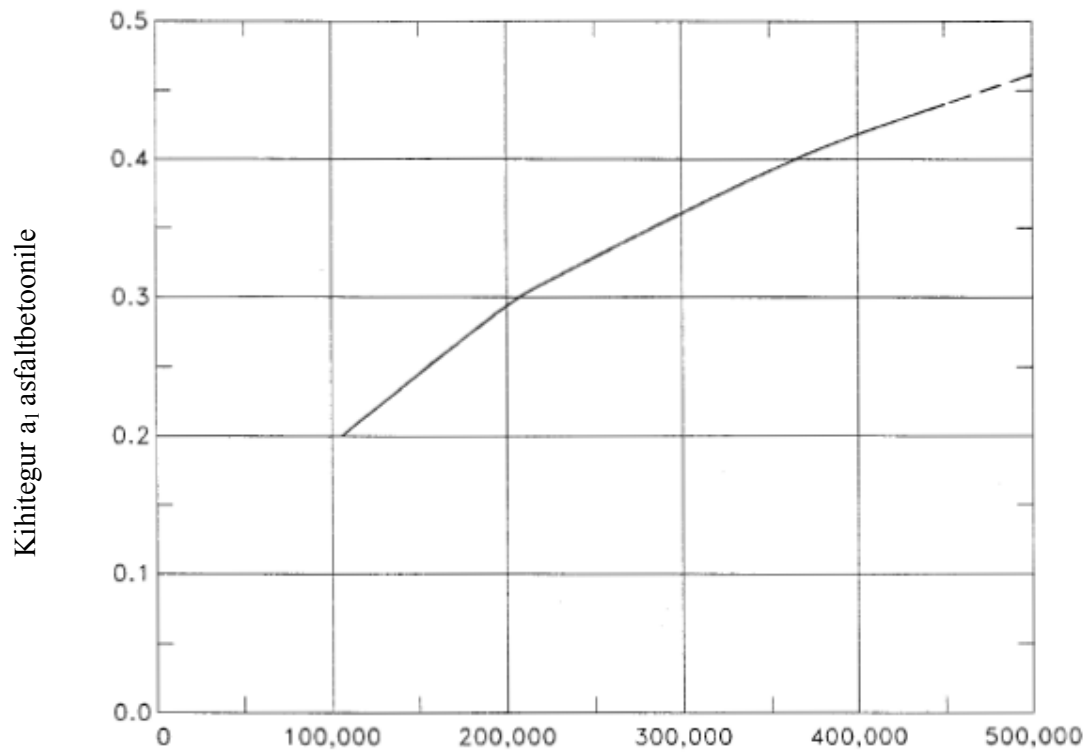
12. LISAD

Lisa 1. Kihitegurite ja struktuurarvu määramise joonised

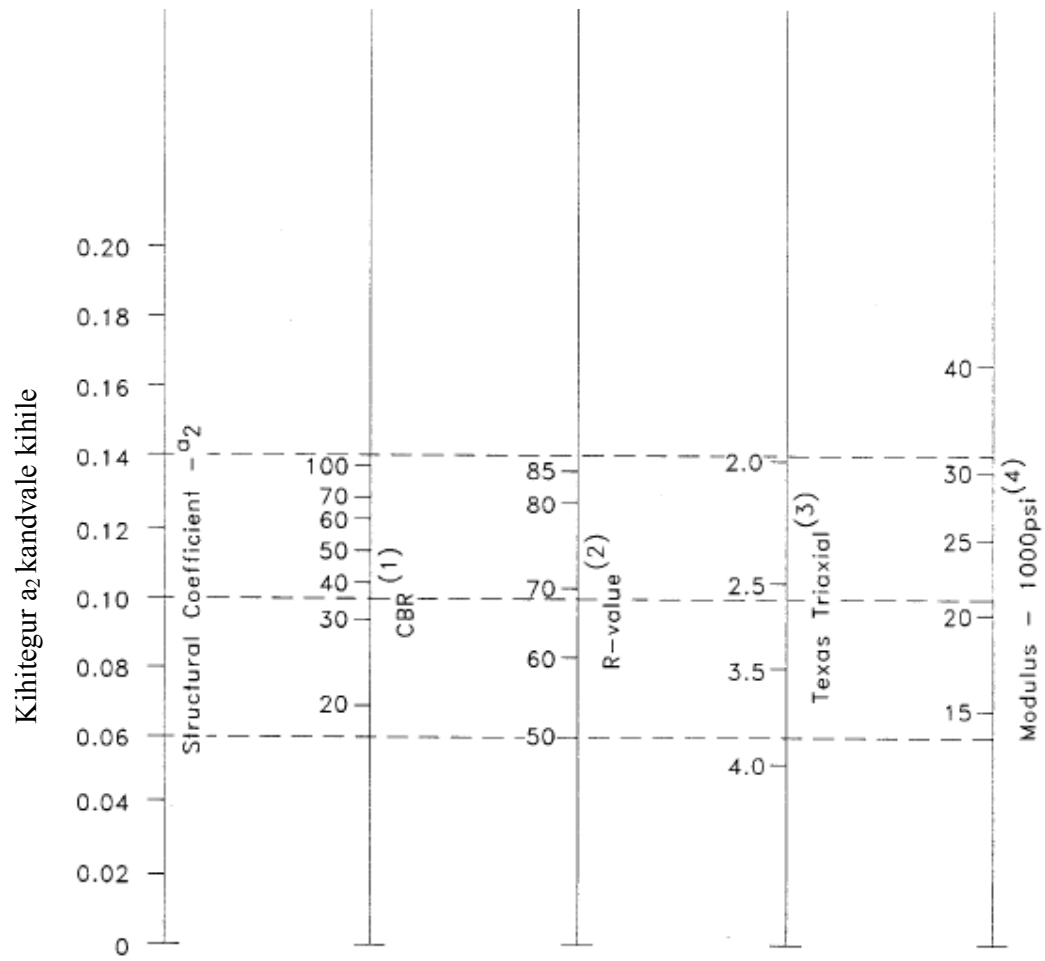
Lisa 2. CBR-arv

Lisa 3. Teekonstruktsiooni näidis

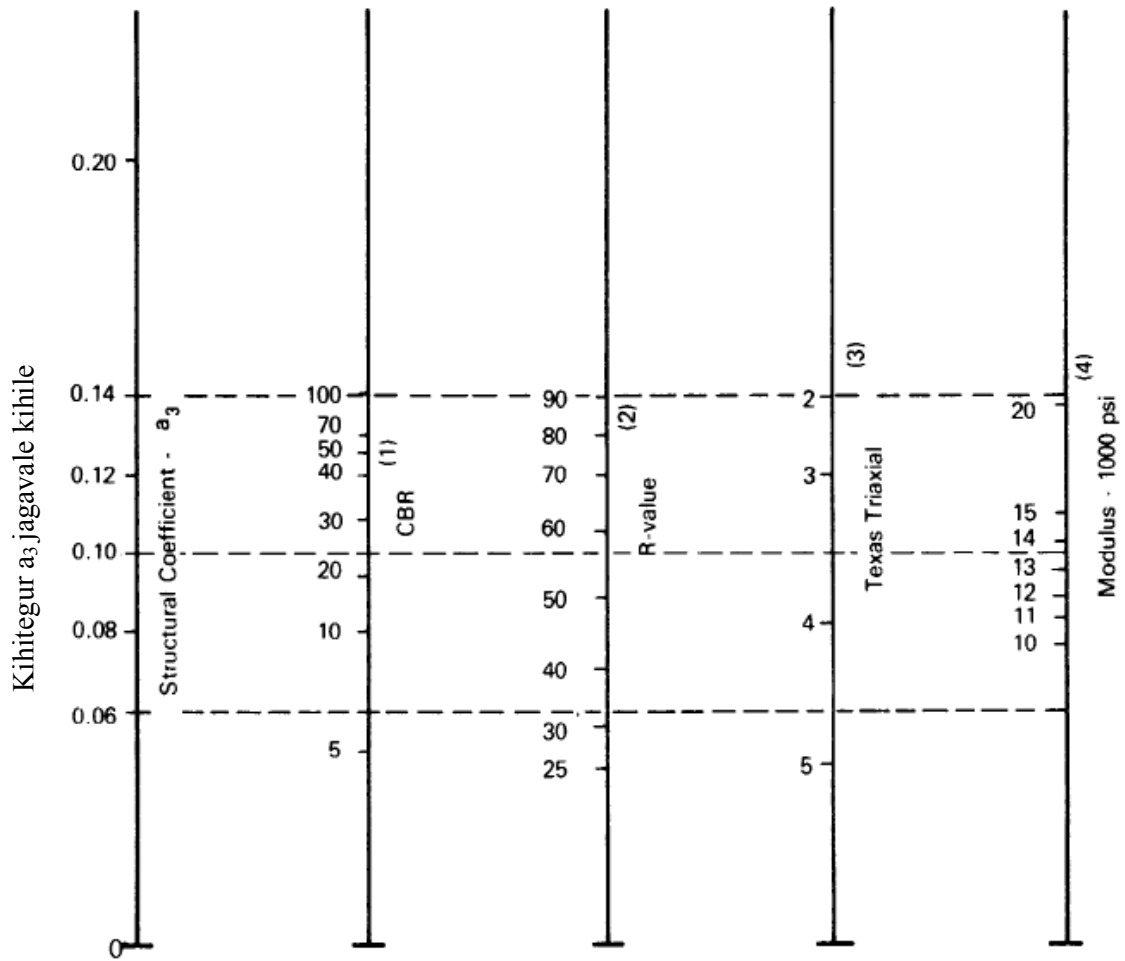
Lisa 1. Kihitegurite ja struktuurarvu määramise joonised [6]



Elastsusmoodul asfaldile E_{AC} (psi) temperatuuril 20°C

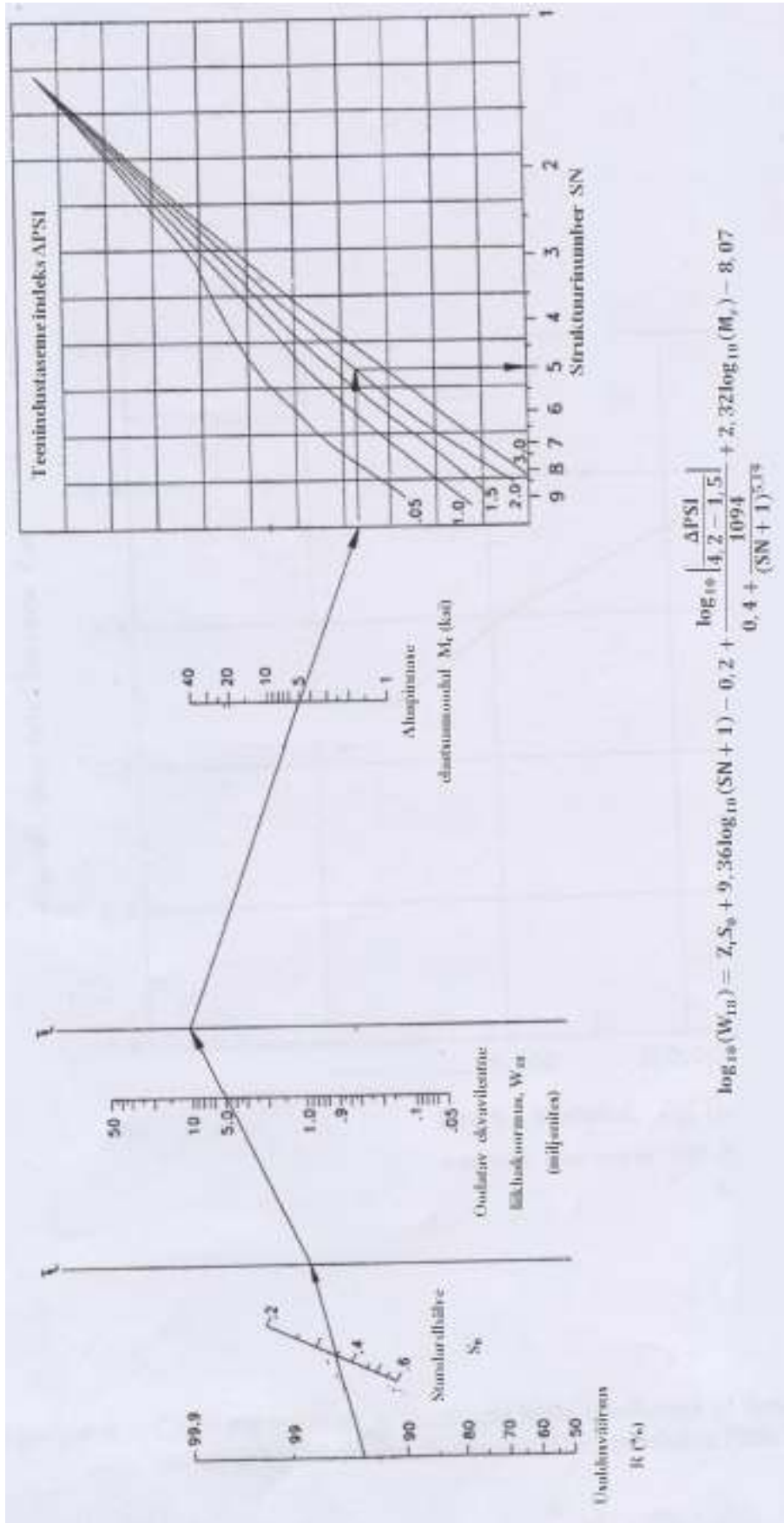


Materjali tugevusnäitajad erinevates mõõtühikutes



Materjali tugevusnäitajad erinevates mõõtühikutes

Struktuurarvu SN määramine nomogrammi abil

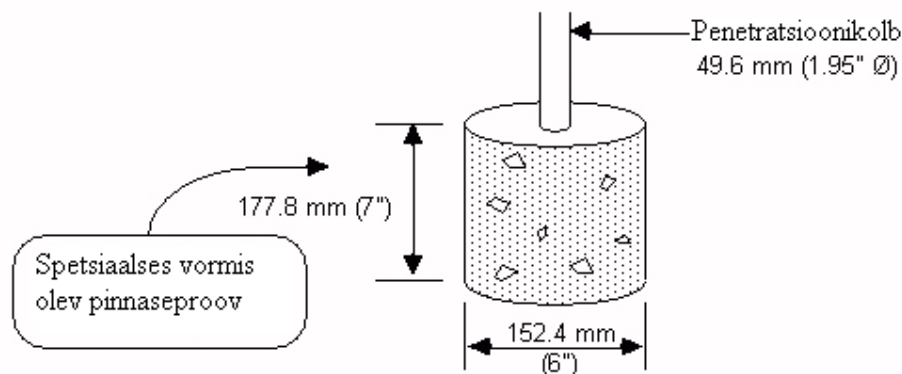


Lisa 2. CBR-arv

Arvutustes, mis on välja töötatud USAs, kasutatakse materjalide tugevusnäitajate iseloomustamiseks CBR – arvu. Seda läheb vaja eelkõige kihitegurite määramisel graafikute alusel ning seeläbi struktuuriarvu arvutamisel. Õige arusaam CBR-arvust aitab kindlustada ka seda, et Eestis kasutatavat katendiarvutusmeetodit saaks ühildada mujal väljatöötatud geovõrkude arvutusprogrammidega, eriti kui need on põhinevad AAHSTO katendiarvutusmeetodil.

AAHSTO kasutab teedehituses kasutatavate pinnaste tugevusnäitajate iseloomustamiseks CBR – arvu (California Bearing Ratio). CBR on penetratsioonikatse hindamiseks materjalide mehaanilist tugevust. Ta on algselt välja töötatud California Department of Transportation'i poolt. Mõõtetest viiakse läbi mõõtes vajalikku survet lävistamiseks silindriga pinnast standardisel alal (joonis 26.). Mõõdetud surve jagatakse survega, mis on vajalik saavutamaks võrdne penetratsioon standardse materjali puhul. CBR testi on kirjeldatud ASTM standardites D1883-05 (laboratoorsed katsed), D4429 (katsed polügonil) ja AAHSTO T195.

CBR töötati välja mõõtmaks materjalide kandevõimet teedehituses. Mida tugevam pinnas, seda suurem CBR-arv. Näiteks CBR 3 vastab haritud põllumaa tugevusele; 4,75 niiskele savile ja alates 10 võib olla juba niiske liiv. Kvaliteetne purustatud kivi on üle 80 CBR-i. Standardmaterjal testi jaoks on purustatud California lubjakivi, mille CBR-arv on 100.



Joonis 27. CBR-arvu mõõtmine

$$\text{CBR} = \frac{x}{y} 100$$

kus

x – mõõdetava pinnase vastusurve suurus (N/mm^2) silindri surumisel pinnasesse 2,54 mm (1 toll) või 5,08 mm (2 tolli) võrra;

y – vajalik surve saavutamaks standardse pinnase penetratsiooni (N/mm^2). 2,54 mm surumiseks läheb vaja 6,9 MPa (1000 psi) võrra survet ning 5,08 mm jaoks 10,3 MPa (1500 psi).

CBRi on juba pikemat aega üritatud ühildada materjalide elastsusmoodulitega. Üldtuntud on võrdus, et $\text{CBR } 1 = 10 \text{ Mpa}$, kuid see seos kehtib vaid väiksemate numbrite puhul. Mitmed uurimisasutused on teinud katseid ning välja andnud valemid teisendamaks CBR-arv Mpa' deks. [19]

AASHTO poolt tunnustatud valem on:

$$M_{r(\text{psi})} = 1500 * \text{CBR}; (1 \text{ psi} = 6,9 \text{ kPa}).$$

Siiski on mainitud, et sellega tuleks olla äärmiselt ettevaatlik, kuna ta ei ole täpne ega tegelikult vasta õigele seosele. Seda võib kasutada vaid CBR-arvu 10 ja väiksema juures ning peeneteraliste materjalide puhul, kus antud seos kehtib. Tegelik CBRi ja elastsusmooduli omavahelise seose graafik ei ole lineaarne vaid mida suuremaks arvud lähevad, seda väiksema nurga all tõuseb graafiku joon.

Transportation and Road Research Laboratory (TRL) on välja andnud uue valemi, mis on ka soovitatud ametlikult asendada olemasolevaga. Valem on:

$$M_{r(\text{psi})} = 2555 * \text{CBR}^{0,64}$$

Saamaks kohe tulemust megapaskalites, oleks valem järgmine:

$$17,6 * \text{CBR}^{0,64}$$

Katsetusmeetodi standardmaterjal on California lubjakivi CBRiga 100, mis antud valemi järgi arvatult vastab 355 Mpa'le. Vastavalt Elastsete teekatendite projekteerimise juhendile 2001-52 oli lubjakivi tugevuseks määratud 400 Mpa. Uuendamisega on seda vähendatud 280 Mpa peale.

Teise valemi on andnud välja South African Council on Scientific and Industrial Research (CSIR):

$$M_{r(\text{psi})} = 3000 * \text{CBR}^{0,65}$$

Selle puhul vastaks 100 CBRi 413 Mpa'le. Antud valem pole praktiliselt kasutuses ning arvutustes ja võrdlustes kasutatakse reeglina kahte esimest, AAHSTO poolt tunnustatud valemit.

Kindlat seost CBRi ja elastsusmooduli vahel on raske leida, kuna CBR-katsetustel mõõdetakse nihketugevust ning see ei ole alati vastavuses materjali mõõdetava jäikuse või mooduliga nagu Mr. Thompson ja Robnett (1979) ei suutnud leida sobivat vastavust CBRi ja elastsusmooduli vahel. Siiski, antud valemid annavad üsna täpse seose ja need on ka rahvusvaheliselt tunnustatud ning üldkasutatavad.

Lisa 3. Teekonstruktsiooni näidis [16]

