

Töö nr 19-05-1490/3

GEOSÜNTEETIDE KASUTAMINE TEE KONSTRUKTSIOONIS

Autor

Pille Sedman

Juhataja

Peeter Talviste

Tallinn 2021

Geosünteedide kasutamine tee konstruktsioonis

Versioon 10.12.2021

Tellija: Maanteeamet / Transpordiamet

Teelise 4

Tallinn 10916

tel. 611 9300

Kontaktisik: Taivo-Ahti Adamson (e-mail: Taivo-Ahti.Adamson@mnt.ee)
Eesti volitatud teedeinsener, tase 8

Töö täitja: IPT Projektijuhtimine OÜ

Aadress: Kalda 60A-2 10922 Tallinn

Telefon: 6 279 220

Koostaja: Pille Sedman (e-mail: pille@geotehnika.ee)

Peeter Talviste (e-mail: peeter@geotehnika.ee)
PhD, Eesti volitatud ehitusinsener geotehnika, tase 8

© Transpordiamet [2021]

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

© OÜ IPT PROJEKTITUHTIMINE

Kui antud töö alusel koostatakse ja avaldatakse Transpordiameti juhend, siis antud töö muutmine ja täiendamine saab toimuda pädeva isiku osalemisel tagamaks geotehnilist terviklikkust ja kohustuslikku kooskõla Eurokoodeksi ja vastavate EVS-ISO-EN standarditega. Muutmiste ja täiendamiste korral ilma IPT Projektijuhtimine OÜ kirjaliku kooskõlastuseta ei oma IPT Projektijuhtimine OÜ vastutust muudetud dokumendis toodud informatsiooni ja esitatud arvamuste eest, vaid see lasub täies mahus töö muutmise teostajal ja avaldajal.

Sisukord

Eessõna	4
1. Sissejuhatus	6
2. Üldised mõisted ja selgitused	7
2.1 Tee konstruktsioon	7
2.2 Füüsilised suurused	8
2.3 Geosünteedid	9
3. Geosünteedide omadused	10
3.1 Indeksomadused	10
3.2 Toime- ja kestvusomadused	13
4. Geosünteedide rakendused	13
4.1 Geosünteedide funktsioonid	13
4.2 Eraldamine	14
4.3 Filtreerimine	15
4.4 Dreenimine	15
4.5 Armeerimine	15
4.6 Struktuurne stabiliseerimine	16
5. Geosünteedide vajaduse hindamine	17
5.1 Ebapiisava kandevõimega aluspinnas	17
5.2 Kvaliteetse mineraalmaterjali vähesus	18
5.3 Osakeste migratsioon erineva terasuurusega kihtide vahel	19
6. Geosünteedi kasutuse põhjendamine	20
6.1 Tootjameetodid	21
6.2 Üldised meetodid	22
7. Geosünteedi valiku põhimõtted	23
7.1 Määratud omadused (normsuurused) ja arvutussuurused	24
7.2 Paigaldusvastupidavus ja vähendavad tegurid	25
7.3 Pikaajaline vastupidavus (kestvus)	26
7.4 Juhiseid geotekstiili valikuks	27
7.5 Juhiseid geovõrgu valikuks	28
7.6 Juhiseid filtreeriva geosünteedi valikuks	28
8. Tehniline spetsifikatsioon	31
LISA A Giroud Noiray analüütiline meetod [14]	33
LISA B FHWA HI-95-038 [15] kirjeldatud meetod	36
LISA C Giroud-Han meetod (2004)	38
LISA D Geosünteedide keemiline koostis ja struktuur	41
LISA E Geosünteedide keemiline vastupidavus	43
LISA F Geosünteede käsitlevad standardid	47

Eessõna

Käesolev juhend käsitleb geosünteedide kasutamist tee konstruktsioonis, aluspinnasel, muldes ja katendi all. Juhend on koostatud Maanteeameti tellimisel vastavalt koostöökokkuleppele IPT Projektijuhtimine OÜ ja Maanteeameti vahel Nr 1-12/19/1457-1.

Juhendi eesmärgiks on luua geosünteedide kasutamise kohta ühtne platvorm, millele saavad tugineda tellija (Maanteeamet), projekteerija, ehitaja, järelevalve jt.

Põhitähelepanu on suunatud geosünteedide toimimisele ning praktilistele rakendustele. Selgitatakse geosünteedide kasutusvajadust ning antakse soovitusel valikuks ja arvutusteks.

Juhendis esitatud seisukohad ja soovitusel tuginevad allpool loetletud materjalides toodud informatsioonile, mida on autori poolt interpreteeritud ja kohandatud vastavalt juhendi eesmärgile.

Peamised juhendi koostamisel aluseks olnud materjalid on toodud alljärgnevalt.

- [1] Robert M. Koerner., Designing with geosynthetics 6th edition Vol 1., 2012 (Rev. 2016)
- [2] Zornberg, Jorge G., Thompson, N., Application Guide and Specifications for Geotextiles in Roadway Applications. Reoprt No FHWA/TX-10/0-5812-1. Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 2010, rev. 2012.
- [3] Geosynthetic Reinforcement of The Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures. GMA White Paper II. Geosynthetic Materials Association. June 27, 2000
- [4] Geosynthetic Design and Construction Guidelines. FHWA-HI-95-038" Robert D. Holtz, Barry R. Christpoher, Ryan R. Berg 1998.
- [5] Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures Using Geosynthetic Reinforcements – EBGeo. German Geotechnical Society, 2010.
- [6] Standard Specification for Geotextile Specification for Highway Applications. AASHTO Designation: M 288-06 (2011).
- [7] NYSDOT Geotechnical Design Manual. Geosynthetic Design. March 1, 2018, rev. 2
- [8] Geosynthetics in Pavement Systems Application. Geosynthetic Materials Association GMA White Paper I. Geogrids. (1998).
- [9] Christopher, Barry R. Junction-strength requirements for roadway design, construction February 1st, 2007 / By: IFAI / Feature, Geogrids.
<https://geosyntheticsmagazine.com/2007/02/01/junction-strength-requirements-for-roadway-design-construction/>
- [10] Coduto, Donald P. Geotechnical Engineeering. Principles and Practices. Prentice hall, Upper Saddle River, NJ 07458. (1999)

- [11] Geogrids in Roadway and Pavement Systems. A design workshop. Conducted by: Barry R. Christopher, Ph.D., P.E. Sponsors: NAUE GmbH & Co. KG, and 23 Nov. – 1 Dec., 2010 Global Synthetics Pty Ltd.
- [12] U. S. Department of Transportation Publication No. FHWA-NHI-10-024
Federal Highway Administration FHWA GEC 011 – Volume I November 2009
NHI Courses No. 132042 and 132043. Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I.
- [13] International Geosynthetics Society (IGS). Guide to the Specification of Geosynthetics. July 2018.
- [14] Giroud, J.P. ja Noiray, L., “Design of Geotextile Reinforced Unpaved Roads,” Jour. Geotech. Eng.Div., ASCE, Vol107, No GT, 1981.
- [15] FHWA NHI-07-092 Geosynthetics Engineering Roadways and Pavements August 2008.
- [16] Giroud, J.P. and Han, J. “Design method for geogrid-reinforced unpaved roads—Part I: theoretical development, Part II: calibration and verification“, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(8), 2004.

ISO/TR 18228-1:2020

Design using geosynthetics — Part 1: General.

ISO/TR 18228-2:2021

Design using geosynthetics — Part 2: Separation.

ISO/TR 18228-3:2021

Design using geosynthetics — Part 3: Filtration.

ISO/TR 18228-7:2021

Design using geosynthetics — Part 7: Reinforcement.

Pikem nimekiri geosünteede käsitlevatest standarditest on toodud LISAS F.

1. Sissejuhatus

Geosünteed on tööstuslikult enamasti polümeeridest valmistatud kihtmaterjal, mida kasutatakse maapõues mitmesuguste funktsioonide täitmiseks.

Ehitusvaldkonnas kasutatakse geosünteede struktuuride tugevdamiseks, armeerimiseks, vee ärajuhtimiseks (dreenimiseks), vee isoleerimiseks ja pinnaseosakeste liikumise tõkestamiseks veejuhtmetesse jm. Geosünteedid on asendamatud keerukate struktuuride – nõlvade, tugisenite, tunnelite – puhul, võimaldades lahendusi, mis ilma geosünteedideta võimalikud ei ole.

Teedehituses on lisaks geosünteedide spetsiifilistele funktsioonidele (armeerimine, eraldamine, vedelike filtreerimine), lisandunud geosünteedide kasutamine katendi töövõime suurendamiseks ja tee nõuetele vastava kasutusea pikendamiseks. Aastate jooksul mitmete autorite poolt läbi viidud mahukad katsed näitavad, et tee, mille konstruktsiooni on õigesse kohta paigaldatud sobiv geosünteed, toimib aja jooksul paremini, kui ilma geosünteedita ehitatud struktuur.

Labori- ja välikatsetele tuginedes on välja töötatud empiirilised meetodid, mis võimaldavad looduslikke ehitusmaterjale kokku hoida, asendades neid osaliselt või täielikult geosünteediga. Geosünteedi toimet põhjendatakse mitme faktori koosmõjuga, mis lõpptulemusena säilitab tee ehitusjärgse seisundi pikemaks ajaks, kuigi geosünteedi täpne toimemehhanism on endiselt mõneti ebaselge.

Geosünteedi projekteerimine teedehituses on sisuliselt optimeerimisülesanne. Projekteerimisel määratakse esmalt tavapärase meetodiga vajalikud konstruktsiooniliste kihtide paksused, seejärel leitakse kihtide paksused, kasutades geosünteedi. Geosünteedi efekt on tuletatud kas tootja enda poolt tehtud või muudest teadaolevatest empiirilistest katsetest. Geosünteedi vajadust hinnatakse variantide kulude võrdluse põhjal. Hindamisel lähtutakse majanduslikust kokkuhoiust, nii otseselt ehitusmaksumuse vähendamisest kui ka loodusvarade säästmise seisukohast.

Samal ajal tuleb arvestada, et ka geosünteedide tootmiseks kulutatakse loodusressursse ja energiat, samuti transpordiks, hoiustamiseks, katsetamiseks jne. Peale kasutamist muutuvad geosünteedid jäätmeteks, samuti pinnas, kui geosünteedi sellest ei eraldata. Geosünteedide jääke sisaldava pinnase taaskasutamine ei pruugi ilma eelneva sorteerimiseta võimalik olla.

Et geosünteed oma funktsiooni täidaks, peab see olema kvaliteetne (vastupidav, püsivate omadustega, tagatud elueaga), sobima antud olukorda ning olema korrektselt paigaldatud. Geosünteedi omaduste kontrolliks on välja töötatud hulk standardmeetodeid, mis võimaldavad geosünteede ka omavahel võrrelda. Sobiva geosünteedi valikuks tuleb esmalt selgitada olemasolevad tingimused ning panna paika eesmärk, mida geosünteediga soovitakse saavutada. Seejärel määratletakse geosünteedi vajalikud omadused, mille põhjal valitakse kandidaat-geosünteedid. Geosünteedi kasutamise põhjendus ja efekt peavad projektis olema selgelt välja toodud.

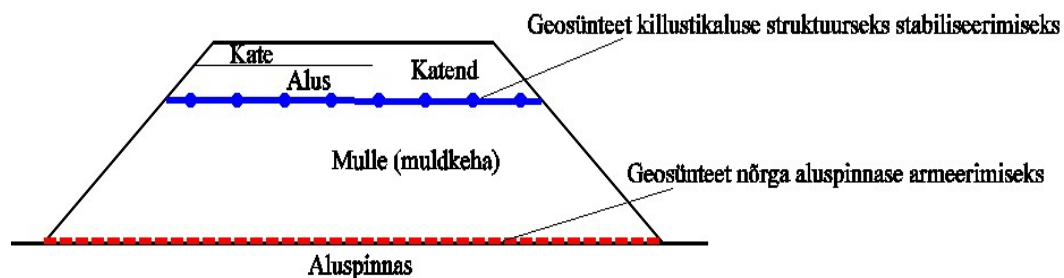
Teed saab rajada ilma geosünteedideta, kasutades sobivat aluse paksust, mis arvestab killustiku kulumist, terade purunemist jms. Killustiku ummistumist saab vähendada pinnasfiltri rajamisega. Samuti saab nõrga aluspinnase korral rajada sellele eraldi tugevduskihi. Kui sobivat teedehitusmaterjali on küllaldaselt, tuleks eelistada naturaalseid materjale ning hoiduda geosünteedide kasutamisest nõ igaks juhuks.

2. Üldised mõisted ja selgitused

Käesolevas juhendis on allpool toodud mõisteid kasutatud alljärgnevas tähenduses, osadele mõistetele on toodud sulgudes ka ingliskeelne vaste.

2.1 TEE KONSTRUKTSIOON

Tee konstruktsiooni puudutavate mõistete sisu on enamasti võetud Maanteeameti juhistest ja dokumentidest. Tee põhimõtteline konstruktsioon on näidatud *Joonisel 1*.



Joonis 1. Tee konstruktsioon

Katend on tee konstruktsiooni ülemine osa, mis võtab vastu liiklusvahenditest tuleneva koormuse ja jaotab selle muldele või mulde puudumisel aluspinnasele. Katend võib koosneda ühest või mitmest kihist, põhikihtideks on kate ja alus.

Kate on vastupidavast materjalist ehitatud pindmine konstruktsioon, mis on võimeline kandma liiklusvahendeid. Kate peab tagama vajaliku haarduvuse liiklusvahendite ratastele, olema sile, rööbaste tekkimisele vastupidav ning takistama vee tungimist tee konstruktsiooni.

Alus (kandev kiht) paikneb kate all ning koosneb enamasti jämedateralisest materjalist (kruus, killustik). Aluse ülesanneteks on koormuse jaotus muldkehale või aluspinnasele, tee konstruktsiooni ült sisenenud vee ärajuhtimine ja konstruktsiooni külmakerke vähendamine.

*Kuna teeterminoloogias kasutav mõiste alus tähendab laiemas mõttes ka „millegi all olevat“, kuid katteta teede puhul on alus ülemiseks kihiks, siis käesolevas juhendis on aluse sünonüümina kasutatud mõistet „**kandev kiht**“.*

Kruus on loodusliku päritoluga ümardunud kujuga kivimitükkidest koosnev materjal, mida kasutatakse kandva kihi ehituseks. Vastavalt standardile EVS-EN ISO 14688-1:2018 on kruusaterade läbimõõt ≥ 2 mm ja < 63 mm.

Killustik on looduslike kivimite või tehismaterjalide purustusprodukt, mille terad on harilikult nurgelise kujuga ning suurema läbimõõduga kui 2 mm, kasutatakse kandva kihi ehituseks.

Dreeniv kiht on kiht tee konstruktsioonis, mille veejuhtivus võimaldab konstruktsiooni sattunud veel vabalt välja voolata.

Mulle (muldkeha) on kontrollitult ehitatud teetamm.

Aluspinnas on looduslik pinnas või kalju, ümbertöötatud looduslik või tehispinnas, millele toetub tee konstruktsioon.

Aluspinnase jaotus tugevuse järgi tehakse enamasti lähtudes dreenimata nihketugevusest c_u või CBR-arvust (California Bearing Ratio) [1], [3], [4]. Käesolevas juhendis kasutatakse *Tabelis 1* toodud jaotust.

Tabel 1. Aluspinnase jaotus tugevuse järgi dreenimata nihketugevuse (c_u) ja E_{v2} põhjal.

Aluskiht	Dreenimata nihketugevus c_u , kPa	E_{v2} MPa
Väga nõrk	30	10
Nõrk	90	30
Mõõduka tugevusega	240	80
Tugev		

2.2 FÜÜSIKALISED SUURUSED

Pinnase ja geosünteedidega seonduvad füüsilised suurused on defineeritud vastava erialakirjanduse baasil, mis on toodud *Eessõnas*.

Pinge on välisjõudude mõjul (teede puhul sõidukite rataste koormus) tee konstruktsioonis tekkivad sisejõud taandatuna pinnaühikule (N/m^2). **Normaalpinge** (σ) mõjub pinnaga risti ja iseloomustab aine osakesi üksteisest eemale rebivate tõmbe- või üksteisele lähendavate survejõudude intensiivsust, pinna sihis mõjuv tangentsiaalpinge ehk **nihkepinge** (τ) näitab aineosakesi piki pinda teiselavate jõudude intensiivsust.

Absoluutne deformatsioon (Δl) on koormuse mõjul toimuv pikkuse muutus. Deformatsioon sisaldab elastset (taastuvat) ja taastumatut (jäävdeformatsiooni) osa.

Suhteline deformatsioon (ε) (*strain*) on pikkuse muutuse suhe algpikkusesse (%):

$$\varepsilon = \Delta l / l$$

Pinnase puhul mõõdetakse tavaliselt absoluutset deformatsiooni ning kasutatakse selle asemel mõistet „vajum“, taastuv deformatsioon on „elastne vajum“.

Geosünteedide puhul kasutatakse suhtelist deformatsiooni, mis näitab geosünteedi suhtelist pikenemist tõmbekatses.

Ühesuunaline deformatsioon toob enamasti kaasa keha deformeerumise ka ristuvast suunas, seda iseloomustab **külglaienemistegur e Poissoni tegur (ν)**, mis on koormuse suunaga ristisuunalise ja paralleelse suhtelise deformatsiooni suhe:

$$\nu = -\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}$$

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

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Pinnase elastusmoodul määratakse kompressiooniolukorras. Pinnase puhul ei ole tegemist pideva materjaliga, elastusmoodulis sisaldub alati ka mingi jäävdeformatsiooni komponent.

Selle tõttu kasutatakse teedevaldkonnas elastusmooduli asemel suurust „**taastuv elastusmoodul**“ (**M_r**) (*resilient modulus*), mis on pinge ja sellele vastava taastuva deformatsiooni suhe, sisuliselt E_{v2} . Pinge ja kogudeformatsiooni suhe on tinglikult E_{v1} .

CBR (*California Bearing Ratio*) on pinnase tugevust iseloomustav suurus, mida väljendatakse protsentides etalonmaterjali suhtes. CBR määratakse laborikatses, mille käigus leitakse ühikpinnale mõjuv jõud, mis on vajalik 50 mm läbimõõduga varda surumiseks testitavasse pinnasesse kiirusega 1.25 mm/min, sügavusele 2.5 mm ja 5 mm. CBR leitakse testis saadud ja standardmaterjalile (killustik) rakendatava jõu suhtena. CBR-katset kasutatakse ka geosünteedide augustamiskatses (*puncture test*).

2.3 GEOSÜNTEEDID

Geosünteede puudutavad mõisted on defineeritud tuginedes *Eessõnas* toodud kirjandusele ja erinevatele normdokumentidele.

Geosünteed on üldmõiste, mis hõlmab kõiki, peamiselt polümeeridest tööstuslikult valmistatud kihtmaterjale, mida kasutatakse maapõues mitmesuguste funktsioonide täitmiseks.

Geotekstiil on elastne ja paindlik kangas, mis on valmistatud tehispolümeeride peentest kiududest, ribadest või lõngast (korrutatud kiud), kas kudumise või muu töötuse käigus.

Kootud geotekstiilid valmistatakse traditsioonilisel kudumisel, geotekstiil koosneb korrapäraselt ristuvatest paralleelsetest kiududest. Kootud geotekstiilid on suhteliselt tugevad ja jäigad, mistõttu neid kasutatakse eelistatult armeerimisel, samas on neil kehvad hüdraulilised omadused [7].

Kudumata geotekstiilid koosnevad juhusliku paigutusega kiududest, mis ühendatakse omavahel mehaanilise, keemilise või termilise töötusega. Mehaaniline töötus tehakse nõeltega, mille tulemusel moodustub tihe vildilaadne struktuur. Keemilise töötuse korral kasutatakse liimilaadset ainet, millega kiud ühendatakse omavahel kontaktpunktides, termilisel töötusel sulatatakse kiud kokku. Kudumata geotekstiilid on enamasti nõrga kuni keskmise tugevuse ja jäikusega ning suurema pikenemisega purunemisel. Neil on head hüdraulilised omadused, mistõttu neid kasutatakse eelistatult filtreerimiseks ja drenimiseks.

Komposiitgeotekstiilid on valmistatud kombineerides kootud ja kudumata viisi, ühendades mõlema tüübi head omadused.

Geovõrk (*geogrid*) on sünteetiline tugevdusmaterjal, mis koosneb erinevates sihtides paralleelsetest ribidest, mille vahekaugus võimaldab võrku ümbritseva täitematerjaliga katkestamata siduda. Valmistusviisi järgi jagunevad geovõrgud ekstruuderdatud, kootud ja keevitatud võrkudeks. Ekstruuderdatud võrgud valmistatakse augustatud polümeerlehest vastava töötlusega. Kootud geovõrgud valmistatakse kiududest lõim-kude meetodil või silmuskudumisel ning kaetakse spetsiaalse kattega. Kevitatud võrkudel ühendatakse polümeerribad keevituse teel.

Tugevuse rakendumise sihi järgi eristatakse ühetelgseid (*oneaxial*), kahetelgseid (*biaxial*) ja mitmetelgseid (*multiaxial*) võrke. Ühetelgne võrk on tugev ühes suunas, ristuv suunas on tugevus ainult võrgu kooshoidmiseks.

Kahetelgse võrgu tugevus on mõlemas ristsuunas sarnane, mitmetelgsel võrgul on tugevus ühesugune kõikides suundades.

Dreeniv geovõrk (*geonet*) on sünteetiline materjal, mis koosneb omavahel ühendatud ristuvatest või lõikuvatest ribidest, mida mööda toimub vedelike tasapinnaline liikumine.

Geokomposiit on liitmaterjal, mis koosneb kahest või enamast eri tüüpi geosünteedist.

Teekonstruktsioonis enamkasutatavad geosünteedi tüübid on **geotekstiilid**, **geovõrgud** ning nende ühendamisel valmistatud **geokomposiidid**.

3. Geosünteedide omadused

Geosünteedide omadused jaotatakse indeks-, toime- ja kestvusomadusteks. Nende omaduste kirjeldamiseks kasutatakse mitmesuguseid näitajaid, mida rakendatakse ka erinevates arvutustes.

Indeksomadused on geosünteedi tootmisjärgselt iseloomustavad omadused, mis määratakse standardiseeritud laborikatsetega. Indeksomadusi kasutatakse toodete spetsifitseerimiseks, võrdlemiseks, vastupidavuse hindamiseks, kvaliteedi kontrolliks ning projekteerimisel. Indeksomadused jaotatakse omakorda füüsikalisteks, mehaanilisteks ja hüdraulilisteks omadusteks. **Toime- ja kestvusomadused** omadused kirjeldavad geosünteedi paigaldamisel ja kasutamisel tekkivaid muutusi.

Geosünteedide omadused ja toime sõltuvad suuresti nende keemilisest koostisest. Lühiülevaade geosünteedide keemilisest koostisest ja struktuurist ning keemilisest vastupidavusest antakse vastavalt *Lisades D ja E*.

3.1 INDEKSOMADUSED

3.1.1 Füüsikalised omadused

Füüsikalised omadused iseloomustavad peamiselt geosünteedi koostises olevate materjalide omadusi. Füüsikalisi omadusi väljendavad parameetrid on defineeritud alljärgnevalt.

Erikaal on materjali (pooriruumi arvestamata) mahukaalu suhe vee (destilleeritud vesi 4°C) mahukaalu.

Ühikpindala mass (*mass per unit area*) (g/m^2) on geotekstiili mass ühikpindala kohta.

Geosünteedi paksus (mm) on geotekstiili pealis- ja aluspinna vaheline kaugus mõõdetud risti pinnaga.

3.1.2 Mehaanilised omadused

Mehaanilised omadused iseloomustavad geosünteedi vastupanu välisjõududele, neid omadusi väljendavad parameetrid on defineeritud alljärgnevalt.

Tõmbetugevus (*tensile strength*) on maksimaalne tõmbepinge (kN/m), mida geosünteeft purunemata talub, vastavalt katsemetoodikale EN ISO 10319 (*wide-width tensile test*).

Tõmbejõud (*grab tensile strength*) on tõmbetugevus väljendatuna jõuna (N), mis on vajalik geosünteedi proovitüki purunemiseks vastavalt katsemetoodikale, mis on toodud ASTM D4632 (*grab tensile test*).

Pikenemine (venivus) on geosünteedi võime tõmbepinge korral pikeneda, väljendatakse (%) suhtelise deformatsioonina.

Ühenduste tugevus on geosünteedi ühenduskoha tõmbetugevus (kN/m).

Geosünteedi **jäikuse** all mõeldakse käesolevas juhendis geosünteedi vastupanu tõmbepingetele. Geosünteedide puhul määratakse materjali jäikust iseloomustavad suurused tõmbepinge-suhtelise deformatsiooni graafikult. Mida suurema jäikusega on materjal, seda väiksemad on tõmbepingete tõttu tekkivad deformatsioonid, samas puruneb jäik materjal väiksemate deformatsioonide juures.

Geosünteedide jäikust erineval pikenemisel iseloomustab **sekantmoodul** (**E_s**) (*secant modulus*) ja **puutujamoodul** (*tangent modulus*).

Sekantmoodul on pinge ja sellele vastava suhtelise deformatsiooni suhe, väärtused antakse erinevate suhteliste deformatsioonide juures (2%, 5%, 10%) mõõdetuna graafiku 0-punktist ning tähistatakse vastavalt E_{s2} , E_{s5} , E_{s10} .

Puutujamoodul määratakse pinge-deformatsioonigraafikult. Graafiku esmase lineaarse osa tõus on sisuliselt Young'i moodul, ka **esmane puutujamoodul** (**E_T**) (*initial tangent modulus*), samuti kasutatakse mõistet *E-moodul* või *geosünteedi moodul*. Puutujamooduli võib määrata suvalisele pinge- või deformatsioonivahemikule.

Kokkusurutavus (*compressibility*) on geosünteedi paksus erinevatel normaalpingetel, väljendatakse graafikuna.

Paigaldusvastupidavus (*survivability*) on geosünteedi võime taluda paigaldusest ja ehitusest tulenevaid pingeid oma omadusi võimalikult hästi säilitades. Paigalduse ja ehitusaegse koormuse mõju geosünteedi omadustele arvestatakse vähendustegurite kaudu.

Vastupanu löögile (*impact resistance*) on geosünteedi võime taluda kukkuvast esemest tingitud lööki. Mõõdetakse džaulides (J), testitakse vastavalt ISO/TS 13433.

Rebenemiskindlus (*burst resistance*) on vastupanu geotekstiili pinnaga risti toimivale lokaalsele survele, väljendatakse kilopaskalites (kPa) ja määratakse ASTM D3786 (Mullen test).

Vastupanu augustamisele (*puncture resistance*) on geosünteedi võime vastu pidada teravatest esemetest põhjustatud survele, testitakse vastavalt EN ISO 12236.

Võrgusõlme tugevus on geovõrgu ribide ühenduskoha tugevus, mida mõõdetakse jõuga (N), mis on vajalik ühenduskohas ribide eraldamiseks.

Võrguava stabiilsusmoodul (*geogrid aperture stability, geogrid in-plane torsional rigidity*) on geovõrgu vastupidavus tasapinnalisele väändele, mis esitatakse ühikutes N-m/deg ning katsetatakse vastavalt ASTM D7864.

3.1.3 Hüdraulilised omadused

Hüdraulilised omadused iseloomutavad geosünteedi võimet juhtida vedelikke läbi geosünteedi, risti või paralleelselt pinnaga. Hüdraulilisi omadusi väljendavad parameetrid on defineeritud alljärgnevalt.

Geotekstiili poorsus (n) on pooride maht kogu mahtu (leitakse ainult kudumata geotekstiilide puhul).

$$n = 1 - m/\rho t, \text{ kus}$$

n poorsus

m ühikpindala mass (g/m^2)

ρ materjali tihedus (g/m^3)

t geotekstiili paksus (m)

Iseloomuliku ava suurus (O_{95}) on geotekstiili pooride suurus, mida 95% selle läbimõõduga osakestest ei läbi.

Veeläbilaskvus on vee kogus, mis liigub ajaühikus läbi geotekstiili ühikulise hüdraulilise gradiendi juures, arvestatuna geotekstiili paksuse kohta:

$$\psi = k_n/t, \text{ kus}$$

ψ läbilaskvus, (s^{-1})

k_n filtratsioonimoodul risti geotekstiili pinnaga (m/s)

t geotekstiili paksus (m) määratletud normaalrõhul

Veejuhtivus (*transmissivity*) on vee kogus, mis liigub ajaühikus geotekstiilis paralleelselt pindadega, ühikulise hüdraulilise gradiendi juures:

$$\theta = k_p t, \text{ kus}$$

θ veejuhtivus

k_p lateraalne filtratsioonimoodul
 t geotekstiili paksus määratletud normaalrõhul

3.2 TOIME- JA KESTVUSOMADUSED

Toimeomadused on geosünteedi omadused, mis ilmnevad peale paigaldamist toimimise käigus. Need määratakse laboris ja välipolügoonidel katsetingimustes, mis vastavad geosünteedi reaalsele töötingimustele.

Peamised geosünteedi toimet iseloomustavad parameetrid on ülesõidu kasutegur TBR (*traffic benefit ratio*) ja aluse (kandva kihi) materjali vähendustegur BCR (*base course reduction*).

TBR on ülesõitude arv kasutades geosünteedi, jagatud ülesõitude arvuga geosünteedi kasutamata, katses etteantud kriteeriumi saavutamisel.

BCR on kihi paksuse vähenemine protsentides geosünteedi kasutades, võrreldes vajaliku kihipaksusega geosünteedi kasutamata.

Kestvusomadused iseloomustavad geosünteedi vastupidavust kestvatele keskkonnamõjutustele ja pikaajalistele koormustingimustele.

4. Geosünteedide rakendused

4.1 GEOSÜNTEETIDE FUNKTSIOONID

Geosünteedide funktsioone rakendatakse tee konstruktsioonis erineval otstarbel: eraldamiseks, filtreerimiseks, drenimiseks, armeerimiseks ja struktuurseks stabiliseerimiseks. Enamasti täidab geosünteed samaaegselt mitut funktsiooni. Nii toimivad koos eraldav ja filtreeriv funktsioon, samuti kattuvad osaliselt armeeriv ja stabiliseeriv funktsioon.

Eraldav (*separation*) funktsioon seisneb kahe materjalikihi mehaanilises eraldamises, kusjuures erinevate kihtide osakesed ei puutu omavahel kokku.

Filtreeriv (*filtration*) funktsioon seisneb geosünteedi võimes lasta läbi vett, takistades samal ajal pinnaseosakeste liikumist.

Dreeniv funktsioon (*drainage*) tuleneb geosünteedi võimest juhtida vedelikku geosünteedi sees paralleelselt pindadega või mööda pinda.

Armeeriv funktsioon (*reinforcement*) tuleneb geosünteedi tõmbetugevusest ning väljendub aluspinnases või tee konstruktsioonis tekkivate pingete ümberjaotamises.

Stabiliseeriv (*stabilisation*) funktsioon seisneb katendi ja geosünteedi koostöös, mille abil saavutatakse katendi toimimise parendamine.

Eesti teedevaldkonnas mõeldakse stabiliseerimise all üldiselt pinnase või aluse materjalide mingil viisil töötlemist, eesmärgiga tõsta aluspinnase või aluse kandevõimet ja

ilmastikukindlust. Eristamaks mõisteid, nimetatakse käesolevas juhendis geosünteedi kasutamist teekonstruktsiooni töövõime suurendamiseks „**struktuurseks stabiliseerimiseks**“.

Inglisekeelses erialakirjanduses nimetatakse geosünteediga „stabiliseerimiseks“ üldiselt eraldamist/filtreerimist, milles sisaldub teatud osa armeerimist. „Mehaaniliseks stabiliseerimiseks“ (mechanical stabilisation) nimetatakse katendi töövõime suurendamist katendi alla paigaldatud geovõrgu abil, kusjuures puudub eraldav ja filtreeriv funktsioon.

Geosünteedide rakendusi tee konstruktsioonis on käsitletud eeldusel, et konstruktsiooni üldstabiilsus on tagatud ka ilma geosünteedita, st geosünteedi purunemine või omaduste halvenemine ei põhjusta struktuuri stabiilsuse kadu.

Tee kandevõime seisukohalt omavad tähtsust vaid armeeriv ja struktuurselt stabiliseeriv geosünteed. Kuigi geosünteed ei osale otseselt tee kandevõime (elastsusmoodul tee pinnal) moodustumises, võimaldab armeerival ja/või struktuurselt stabiliseerival eesmärgil kasutatud geosünteed vähendada vajalikku kandevõimet sama liikluskoormuse ja tee eluea puhul. Armeeriva või stabiliseeriva geosünteedi kasutamisega saab vähendada konstruktsiooni kihtide paksust või samade kihipaksuste korral pikendada tee eeldatavat eluiga.

Kui armeeriva geosünteedi mõju on suunatud peamiselt geosünteedi all paiknevale kihile, siis struktuuri stabiliseeriva geosünteedi mõju on suunatud geosünteedi peal asuvale kihile. Funktsioonide jaotus sõltub peamiselt aluskihi tugevusest ning seda iseloomustab *Joonis 2*.

GEOSÜNTEEDI TOIME	STRUKTUURNE STABILISEERIMINE			
	ARMEERIMINE			
Aluskiht	Väga nõrk	Nõrk	Mõõduka tugevusega	Tugev
Dreenimata nihketugevus (c_v), kPa	30	90		240
E_{v2} (M_v), MPa	10	30		80

Joonis 2. Geosünteedi toime sõltuvalt aluskihi tugevusest.

Kui geosünteedi kasutatakse ainult eraldamise, filtreerimise ja dreenimise eesmärgil, puudub geosünteedil tee kandevõimele mõju.

4.2 ERALDAMINE

Eraldamine on kahe erineva materjalikihi segunemise vältimine geotekstiili abil.

Eraldamine iseseisva rakendusena on vältimatu, kui peeneteraline kiht paikneb jämedateralisel materjalil ning võib toimuda peenete osakeste varisemine alumisse kihti gravitatsioonijõu või vibratsiooni tõttu. Enamasti on eraldamine kaasnev funktsioon (kombinatsioon teiste geosünteedide kasutamisega), seetõttu antud juhendis seda eraldi ei käsitleta.

4.3 FILTREERIMINE

Filtreerimiseks paigaldatakse geotekstiil kahe väga erineva terasuurusega materjali kihtide vahele, millega takistatakse peente osakeste kannet veega jämedateralise materjali pooriruumi. Filtreerimise puhul liigub vesi geosünteedist läbi ristisuunas.

Filtreerivaid geosünteeide kasutatakse laialdaselt drenaažisüsteemides, kaitsmaks drenaažitorusid ja vett juhtivat täitematerjali ummistumise eest.

Teekonstruktsioonis esineb teatud tingimustel (veeküllastunud peeneteraline kiht jämedateralise kihi all) nõ pumpamisnähtus. See seisneb peente osakeste liikumises koos veega ülemisse, suurema pooriruumiga kihti, rehvi koormuse all hetkeliselt suurenenud poorirõhu mõjul. „Pumpamisnähtus“ põhjustab dreniiva kihi ummistumist ja ning materjali väljakannet alumisest kihist. Osakeste massilise väljakande tulemusel või kiht koheneda ja selle kandevõime halveneda. „Pumpamisnähtuse“ vastu kasutatakse sageli geosünteedi kahe kihi vahel.

Geotekstiili olulised omadused, mis filtreerimist kontrollivad on poorsus, avatud osa suurus, iseloomulik ava suurus, vee läbilaskvus.

4.4 DREENIMINE

Dreenimine seisneb geotekstiili või dreniiva geovõrgu (*geonet*) abil veele vaba liikumistee loomises. Tee konstruktsioonis saab kasutada sobivat geosünteedi dreniiva kihina või kapillaarvee tõusu katkestamiseks. Dreenimiseks kasutatakse geotekstiile või dreniivaid geovõrke, mida iseloomustab hea veejuhtivus.

4.5 ARMEERIMINE

Armeerimine on aluspinnases või tee konstruktsioonis tekkivate pingete vähendamine tõmbetugevust omava elemendi abil. Geosünteedi tõmbetugevuse rakendumiseks peab aluspind teatud määral deformeeruma.

Tugeva aluspinnase või kattega teede puhul on ratta koormusest tekkivad aluspinnase deformatsioonid väga väikesed, mistõttu geosünteedi pingestumist praktiliselt ei toimu ning armeeriv efekt puudub või on väga väike. Seetõttu on armeerimine efektiivne vaid nõrkade ja väga nõrkade aluspinnaste (*Tabel 1*) puhul, kui koormuse mõjul tekivad märgatavad deformatsioonid.

Armeeriva geosünteedi kasutamine võimaldab kihi pinnal töötamist ja vähendab materjali kulu. Käesoleva käsitluse järgi ei suurenda armeeriv geosünteed aluspinnase tugevust. Teetammi rajamisel nõrkadele ja väga nõrkadele pinnastele tuleb tammi stabiilsus kontrollida vastavalt EN 1997-1 nõuetele ning sellisel juhul tugevdamiseks kasutatava geosünteedi arvutus tuleb teha stabiilsusanalüüsi käigus. Vastav meetodika on toodud FHWA-HI-95-038 [4].

Üldjuhul ei ole ehitusmasinatega võimalik korduvalt sõita kihil, mille E_{v2} on alla 45 MPa. Töötamiseks tuleb nõrgale aluspinnale vedada täitematerjalist tugevduskiht, mille paksust on võimalik vähendada aluspinnasele laotatud armeeriva geosünteediga. See on eriti aktuaalne juhul,

kui sobivat täitematerjali pole lähiumbruses küllaldaselt saadaval, samuti võib geosünteedi kasutamisel väheneda aja- või tööjõukulu. Armeeriva geosünteedi kasutamine on asjakohane väga nõrkade, suure veesisalduse ja poorsusega pinnaste (muda, turvas, voolava konsistentsiga savi) korral, mille dreenimata nihketugevus (c_u) on alla 30 kPa, kui kasutatakse raskemat tehnikat.

Geosünteedi kasutamisel rakendub väliskoormusest tekkinud pinge osaliselt geosünteedile, mistõttu vähenevad nihkepinged aluspinnases. Samal ajal töötab geosünteed ka pingejagajana, mis jaotab ehitusmasinatest tekkiva koormuse laiemale pinnale. Geotekstiili kasutamisel lisandub ka filtreeriv funktsioon ning lisaks takistab geotekstiil täite sissesurumist või vajumist nõrka pinnasesse.

Väga nõrkade pinnaste puhul tuleb arvestada, et staatilise koormuse lisamisel (lisanduva pinnase kaal) toimub pinnase tihenemine (filtratsioon-konsolidatsioon), mis võib olla pikaajaline. Geosünteedi kasutamine või mitte kasutamine selle vajumise absoluutväärtust ja ajalist kulgemist ei mõjuta. Protsessi saab kiirendada vertikaaldreenidega ning vajumite absoluutväärtusi vähendada pinnaseomadusi parandades (eeltihendamine, ületihendamine, sideainega stabiliseerimine jne). Aluskihi tugevus saab kasvada ainult pooride mahu vähenemise arvelt.

Suhteliselt suurte deformatsioonide ja väikese tugevuse tõttu ei saa nõrk aluskiht isegi geosünteediga armeeritult jääda sügavusele, kus selle tugevus tee kandevõimet mõjutab. Geosünteediga armeerimine on enamasti lühiajaline lahendus, mida kasutatakse tööplatvormide, ajutiste või katteta teede puhul, kus suurem roopa sügavus (>75 mm) on aktsepteeritav.

4.6 STRUKTUURNE STABILISEERIMINE

Struktuurne stabiliseerimine on katendi pikaajalise töövõime suurendamine killustik- või kruusaaluse alla paigaldatud suure jäikusega geosünteedi (geovõrgu või vajadusel võrgust ja geotekstiilist moodustatud geokomposiidi) abil.

Laboratoorsete ja välikatsete tulemusel on selgunud, et geovõrkude kasutamine katendi all suurendab sama roopasügavuse juures ülesõitude arvu ja seega tee eluiga.

Konkreetne toimemehhanism tekib ilmselt mitme faktori koostoimel, mis annab geovõrgule üldise siduva ja killustikku lukustava toime. Lukustumise tõttu ei saa killustiku üksikud agregaadid liikuda, mille tulemusena aeglustub roobaste teke ja tee kasutusaeg pikeneb. Erialakirjanduses ongi geovõrkudega struktuurse stabiliseerimise kirjeldamisel välja toodud järgmised aspektid:

- lukustusmehhanism, mis vähendab kandvas kihis osakeste võnkeid ja nihkumist;
- geovõrgu suhteliselt suur jäikus, mille tõttu pingestumine toimub juba väikestel deformatsioonidel, mis omakorda viib nihkepingete vähenemisele aluskihis;
- geovõrgu pinget jaotav ja rehvi „jälge“ ühtlustav mõju ning sellest tulenevalt kihtide elastele deformeerumisele kaasneva jäävdeformatsiooni aeglasem areng.

Struktuurne stabiliseerimine geovõrkudega tuleb kõne alla alaliste teede puhul, mida kasutatakse pika aja jooksul ning teepinna lubatud deformatsioonid on väikesed.

Ajutiste teede ja tööplatvormide puhul, kui ülesõitude arv on väike ja lubatud deformatsioonid suuremad, saab kasutada geovõrkude kõrval ka geotekstiile. Sel juhul geovõrgule omase lukustusmehhanismiga arvestada ei saa, selle asemel toimib geotekstiil ja aluse vaheline hõõre.

Struktuurse stabiliseerimise efekt realiseerub tee-ehitusmaterjali kokkuhoius või tee kasutuskõlbliku eluea pikendamises sama materjalikoguse korral.

5. Geosünteedide vajaduse hindamine

Geosüntee on tehnikult valmistatud produkt, mille tootmiseks on kulutatud ressursse. Tee konstruktsioonis on geosünteedil oma eluiga, mille käigus selle toime hakkab vähenema ning lõpuks lakkab. Oma toime kaotanud geosüntee laguneb looduses väga aeglaselt. Mineraalmaterjalid, kuhu on paigaldatud geosüntee, muutuvad varem või hiljem plasti sisaldavateks jäätmeteks, kust mikroplast saab levida ümbritsevasse keskkonda. Geosünteedi sisaldava mineraalmaterjali taaskasutamiseks või ladestamiseks väljaspool prügilat tuleb geosünteedi jäägid eemaldada, käidelda või utiliseerida nõuetekohaselt, et vältida mikroplastide teket ja levikut. Paratamatult kaasneb geosünteedi kasutusmugavusega pikaajaline keskkonnasaaste, selle tõttu tuleb geosünteede kasutada ainult siis, kui nendega saavutatakse eelised võrreldes traditsiooniliste lahendustega. Traditsiooniliste lahenduste all mõeldakse tee rajamist ilma geosünteedideta.

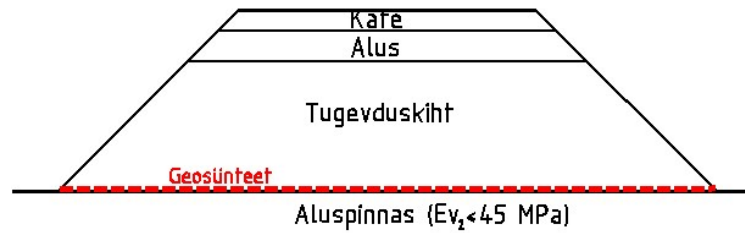
Geosünteedi kasutusvajaduse põhjendamine toimub variantide võrdluse käigus. Töötatakse välja lahendused, mille puhul kasutatakse traditsioonilisi tee-ehitusmaterjale ning tehnoloogiat (keemiline stabiliseerimine, mehaaniline stabiliseerimine jne) ning lahendused, mille puhul osa mineraalmaterjalist või selle toimest on asendatud geosünteediga.

Geosünteedi kasutamise efekt konkreetsetes tingimustes tuleb tõendada variantide tehnilis-majandusliku võrdluse käigus. Geosünteedi puhul tuleb lisada ka nõ saastemaksumus ehk hinnangulised hilisemad eemaldamis-, käitlus- ja muud kaasneva võivad kulud, mis lihtsuse mõttes võib võtta võrdseks geosünteedi paigaldamiseks ja kohaletoomiseks tehtud kulutustega.

Tee puhul on geosünteedide kasutamine näidustatud alljärgnevatel asjaoludel, mis sageli esinevad koos.

5.1 EBAPIISAVA KANDEVÕIMEGA ALUSPINNAS

1. Aluspinnase kandevõime on ebapiisav, kui selle omadused ei võimalda katendit sellele otse projekteerida või ehitusmasinatega kihi pinnal töötada. Kogemuslik-hinnanguline suurus on kihi pinnalt määratud moodul $E_{v2} = 45 \text{ MPa}$, millest madalama väärtuse puhul ei saa kihi pinnal ehitusmehhanismidega sõita. Ekvivalentne pinnasse drenimata nihketugevus (c_u) on 135 kPa (kasutatav kriteeriumine vaid savipinnaste korral) ning $\text{CBR} \approx 4$.
2. Ebapiisava kandevõimega aluspinnasele tuleb kihi pinnal töötamiseks ja katendi rajamiseks paigaldada nõ tugevduskiht. Aluspinnasele, tugevduskihi alla laotatud geosüntee (vt *Joonis 3*) aitab tõmbetugevuse rakendumisel vähendada koormust aluspinnasele, lisaks takistab täitematerjali vajumist aluspinnasesse ehitusmasinate koormuse all. Sel viisil on võimalik vähendada tugevduskihi paksust ning vähendada täitematerjali kogust



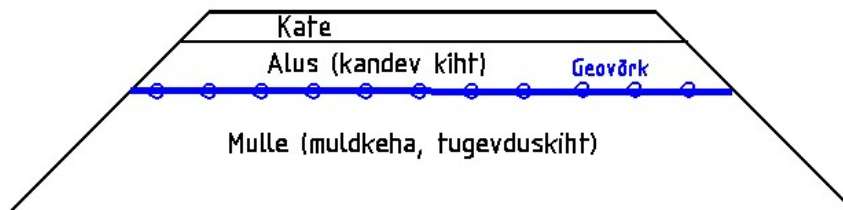
Joonis 3. Geosünteedi paiknemine ebapiisava kandevõimega aluspinnase puhul.

3. Geosünteedi põhifunktsiooniks on aluspinnase armeerimine, milleks saab kasutada geotekstiili või geovõrku. Geosünteedi maksimaalne tõmbetugevus rakendub teatud deformatsioonil. Üldreeglina on geotekstiilide puhul vaja selleks suuremaid deformatsioone kui geovõrkude puhul. Selle tõttu sobivad geotekstiilid nõrga aluspinnase puhul ($c_u \leq 60$ kPa), kui tekkivad deformatsioonid on suuremad ning geosünteedi tõmbetugevust saab maksimaalselt ära kasutada. Suurema jäikusega geovõrgu tõmbetugevus realiseerub väiksemate deformatsioonide juures. Geosünteedi tüübi valikul (geotekstiil, geovõrk või neist koosnev geokomposiit) tuleb arvestada ka muude tingimustega, kas on vajalikud geosünteedi muud funktsioonid (filtreerimine, eraldamine).
4. Kui tugevduskiht on katendi osa (sidumata täitematerjalist katendite puhul), siis olenevalt kasutatavast geosünteedist, võivad tee pinnale tekkida teatava sügavusega roopad. Ajutiste teede, tööplatvormide jm puhul on suurema sügavusega roopad aktsepteeritavad.

Kui tugevduskihi toime on kavandatud lühiajalisena, peamiselt ehitusperioodiks, ning muldkeha rajatakse tugevduskihi peale, siis peale muldkeha konstruksiooniliste kihtide valmimist aluspinnasele armeerimiseks paigaldatud geosünteed tee toimimist ei mõjuta.

5.2 KVALITEETSE MINERAALMATERJALI VÄHESUS

1. Juhul kui kandva kihi ehituseks sobivat kvaliteetset täitematerjali pole piisavalt mõistlikel tingimustel saadaval, võimaldab sobiva geosünteedi kasutamine vähendada täitematerjali kulu ehk kandva kihi paksust.
2. Geosünteedi funktsioon on kandva kihi struktuurne stabiliseerimine, mida tehakse üldreeglina geovõrguga. Täitematerjali terade lukustumine sobiva suurusega võrgusilmades, vähendab kandvas kihis osakeste vönkeid ja nihkumist, mille tulemusel hoitakse kandvat kihti paremini koos ning see võimaldab vähendada kandva kihi paksust. Struktuursel stabiliseerimisel on geosünteedi toime pikaajaline, peab kestma kogu tee eluea jooksul.
3. Geovõrk paigutatakse kandva kihi alla (vt. Joonis 4) või suurema paksusega kandva kihi puhul ka täiendavalt kihi sisse.



Joonis 4. Geosünteedi paiknemine struktuursel stabiliseerimisel

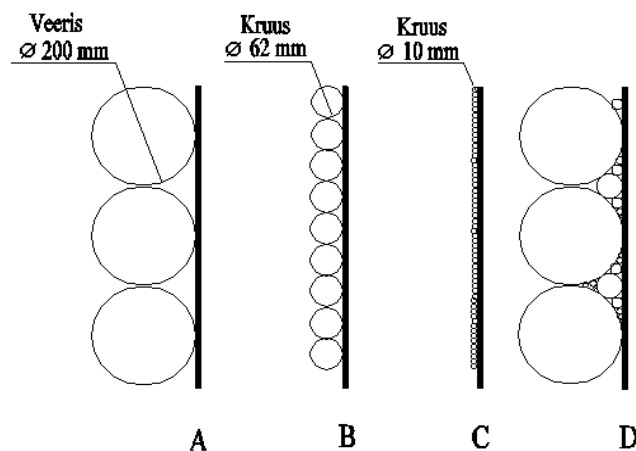
5.3 OSAKESTE MIGRATSIOON ERINEVA TERASUURUSEGA KIHTIDE VAHEL

Väga erineva terasuurusega kihtide kõrvuti paiknemisel võivad peenemad terad migreeruda teise kihi pooriruumi, mille tulemusel võib häiruda mõlema kihi toimimine. Nähtus toimub kas gravitatsioonijõu mõjul varisemisena või veega uhtumisel ning veeküllastunud pinnases nõ pumpamisnähtusena.

5.3.1 „Pumpamisnähtus“

Nähtus seisneb peente osakeste „pumpamises“ kas aluspinnasest või muldkehast jämedateralisse kandvasse kihti veeküllastuse tingimustes ehk vee liikumise tõttu. Selle tulemusel võivad nii kandva kihi kui ka doonorkihi omadused halveneda. Kui „pumpamise“ tõttu võib kannatada tee toimimine, tuleb kasutada sobivat pinnasfiltrit või tõkestavat/filtreerivat geosünteedi.

Peente osakeste sissekanne teise kihti toimub vaba pooriruumi olemasolul. Joonisel 5 on võrdlevalt näidatud erineva terasuurusega kruusad. Jooniselt 5 on näha, et mida suurema ja ühtlasema läbimõõduga osakestest täitepinnas koosneb, seda suuremad on poorid (A) ning oht peenemate osakeste sissekandeks. Pooride suurus väheneb terade läbimõõdu vähenemisel (B, C) ning teatud poorisuuruse juures sissekannet enam ei toimu. Samuti on peente osakeste sissekanne takistatud, kui pooriruum on eelnevalt ühtlaselt täidetud (D).



Joonis 5. Pooriruumi suuruse sõltuvus terasuurusest.

Vajadus kihtide eraldamiseks selgitatakse doonorkihi ja kasutatava täitematerjali lõimise võrdluse teel.

Hinnanguks on kasutusel erinevad kriteeriumid, üks võimalus on toodud alljärgnevas *Tabelis 2*.

Tabel 2. Kriteeriumid tõkestamisvajaduse hindamiseks. Koostatud Coduto (1999) [10] põhjal.

Peenosiste (<0.075 mm) sisaldus aluspinnases %	Kriteerium
<15	$D_{15} \leq 4d_{85}$
15-39	$D_{15} \leq ((40-A)/25)(4d_{85}-0.7 \text{ mm}) + 0.7 \text{ mm}$
40-85	$D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$
>85	$D_{15} \leq 9d_{85}$, kuid mitte väiksem kui 0.2 mm

Tabelis 2 toodud tähistete seletus:

D_{15} on terasuurus, millest 15% täitematerjalist on peenem,

d_{85} on terasuurus, millest 85% aluspinnasest on peenem,

A on terasuurusega <0.075 mm osakeste protsent aluspinnases.

Kui aluspinnase ja täite lõimis vastab *Tabelis 2* toodud kriteeriumidele, siis „pumpamist“ märkimisväärses mahus ei toimu ning lisameetmete rakendamine kihtide eraldamiseks ei ole vajalik.

Kui kihtide eraldamine on osaksete võimaliku sissekande tõttu vajalik, on võimalik rajada spetsiaalne filterkiht mineraalmaterjalist või kasutada vastavate omadustega geosünteedi. Geosünteedi funktsioon on selle ülesande juures filtreerimine.

5.3.2 Mehaaniline migratsioon

Juhul, kui esineb oht peeneteralise materjali liikumiseks jämedateralisemasse kihti gravitatsioonijõu, vibratsiooni, uhtumise vm faktori tõttu, on võimalik rajada spetsiaalne tõkkekiht mineraalmaterjalist või kasutada vastavate omadustega geosünteedi. Geosünteedi funktsioon on selle ülesande juures eraldamine.

6. Geosünteedi kasutuse põhjendamine

Kui geosünteedi kasutamine on antud oludes näidustatud (vajalik armeerimine, struktuurne stabiliseerimine, filtreerimine vm), tuleb tõendada, et geosünteedi kasutamine annab efekti.

Geosünteedi kasutuse põhjendamiseks tuleb teha esmane geosünteedi tüübi valik. *Tabelis 3* on toodud soovituslik lähenemine geosünteedi tüübi valikul sõltuvalt aluspinnase tugevusest ja geosünteedi funktsioonist.

Tabel 3 Geosünteedi tüübi valik

Aluskiht	Väga nõrk	Nõrk	Mõõduka tugevusega ja tugev
Dreenimata nihketugevus (c_u), kPa	30	60	90
ARMEERIMINE	GEOTEKSTIIL GEOVÕRK		
FILTREERIMINE	GEOTEKSTIIL		
STRUKTUURNE STABILISEERIMINE		GEOVÕRK	

Geosünteedi kasutus põhjendatakse arvutustega. Kahjuks puudub teede valdkonnas geosünteedide efektiivsuse hindamiseks universaalne, teooriale tuginev meetodika. Välja on töötatud erinevaid arvutusskeeme ja meetodeid, mis kõik on sisult empiirilised. Need põhinevad teatud tüüpi ja/või kindla tootja geosünteedidega praktiliselt läbi viidud katsetel ning kasutavad katsetustel saadud seoseid.

Arvutusmeetodid seisnevad konstruktsiooniliste kihtide paksuse määramises geosünteedi kasutades ning ilma geosünteedita. Geosünteedi efekt realiseerub konstruktsioonilise kihi paksuse vähenemises ning sellest tulenevalt materjali-, aja-, tööjõu- ja muude kulude kokkuhoius. Kui geosünteedi kasutamisest tuleneb majanduslik või muu efekt, on geosünteedi kasutamine põhjendatud.

Geosünteedi efekti peente osakeste migratsiooni tõkestamiseks leitakse variantide võrdluse teel, kasutades sobiva terasuurusega filterkihte ning geosünteedi.

Eristatakse üldisi arvutusskeeme ja nõ tootjameetodeid. Üldistest arvutusmeetoditest on alljärgnevalt tutvustatud Giroud ja Noiray analüütilist meetodit, FHWA HI-95-038 toodud meetodit ning Giroud-Han meetodit (2004).

6.1 TOOTJAMEETODID

Suuremad tootjad pakuvad oma kodulehtedel arvutusprogramme täitematerjali kihi paksuse vähendamiseks ja säästu arvutamiseks nende valmistatud geosünteedide kasutamisel, samuti pakutakse nõustamist geosünteedi valiku osas.

Arvutusalgoritmid tuginevad kas mõnel üldisel tuntud meetodil, mida on kalibreeritud oma toodanguga tehtud katsetega, või tuginevad ainult empiirilistel katsetustel. Need meetodid ühendavad geosünteedi valiku ja kihipaksuse arvutuse ning võimaldavad leida antud tingimustesse sobiva geosünteedi tootja valikust. Sisuliselt on tegemist tootja poolt oma toodangu kasutamiseks välja töötatud kataloogilahendustega, mida teiste tootjate geosünteedidele rakendada ei saa.

Allpool kirjeldatud üldlevinud meetodid eeldavad aluspinnase/aluskihi teatavaid deformatsioone ning ei ole kasutatavad tugeva aluspinnase/aluskihi korral. Siiski on tootjate poolt tõendatud, et sidumata materjalist kandva kihi puhul toimib struktuurne stabiliseerimine ka tugeva aluskihi korral, näiteks heksagonaalsete võrkude puhul. Igasuguste uudsete materjalide kasutamisel saab toetuda ainult tootja katsetustele ning seetõttu tuleb kasutuse põhjendus teha vastavalt tootja

metoodikale. Äärmiselt tähtis on valida usaldusväärne tootja, kellel on olemas vastavad katselaborid ja katsepolügoonid.

6.2 ÜLDISED MEETODID

Üldiste arvutusmeetodite kasutamisel tuleb meetodite üksikasjad, kasutamise tingimused ja piirangud põhjalikult selgeks teha. Selleks leidub õpikutes ja artiklites küllaldaselt materjali.

Sõltumata meetodist on algandmeteks:

- Aluspinnase tugevus, mis määratakse tee geotehnilise uuringu käigus. Kui seda pole tehtud, tuleb aluspinnase tugevust hinnata projekteerijal analoogia põhjal kogemuslikult.
- Toimetingimused (ülesõitude arv, teljekoormused jne), mis on ette antud ka tee projekteerimise lähteülesandega või saadakse muust asjakohasest dokumentatsioonist.

Sõltuvalt meetodist:

- andva kihi omadused,
- kandidaatgeosünteedide omadused.

Tegemist on kasutuspiirseisundiga, mille puhul tuginedes standardile EVS-EN 1997-1:2006 ei ole vaja geotehnilistes parameetrites osavarutegureid kasutada.

Kuigi kõikide meetoditega saab leida kandva kihi (täitekihi) paksuse geosünteedi kasutamata, võib selle leida ka muu meetodiga.

6.2.1 Giroud ja Noiray analüütiline meetod (1981) [13]

Meetod töötati välja geotekstiilide kasutamiseks aluspinnase armeerimiseks süsteemis aluspinnas – sidumata täitematerjal (kandev kiht) ning põhineb geotekstiili tõmbetugevuse rakendumisel, mis võimaldab vähendada koormust aluspinnasele (armeerimine, vt *Joonis 3*).

Arvestatakse aluspinnase tugevust, välistingimusi ja geosünteedi enda omadusi. Arvutus tugineb geomeetrilisele mudelile, mis arvestab kihi pinnale avalduva pinge hajumist sügavuse suunas nii geosünteedi kasutamisel aluspinnasel kui ka ilma. Meetodika järgi leitakse antud tingimustes täitekihi paksus ilma geotekstiilita ning täitekihi paksus juhul, kui aluspinnasel (aluskihil) kasutatakse geosünteedi. Giroud Noiray meetodi lühikirjeldus ja arvutusnäide on toodud *Lisas A*.

6.2.2 FHWA HI-95-038 toodud meetod [14]

Meetodit kasutatakse täitekihi paksuse leidmiseks geotekstiiliga armeerimisel, kui aluspinnase nihketugevus (c_u) on alla 90 kPa (CBR<3).

Meetod arvestab aluspinnase tugevust, välistingimusi (ülesõitude arv, teljekoormus, roopa sügavus jne), kuid jätab analüüsist välja geosünteedi enda omadused. Geosünteedi nõutavad omadused sätestatakse vastavalt geosünteedi kasutusfunktsioonile, rajamistingimustele jm (AASHTO M288, GeoNorSpec). Meetodi lühikirjeldus ja arvutusnäide on toodud *Lisas B*.

6.2.3 Giroud-Han meetod (2004) [15]

Täiustatud Giroud Noiray meetod, mis on mõeldud kasutamiseks süsteemis aluspinnas – sidumata täitematerjal (kandev kiht) konstruktsiooniliste kihtide paksuse leidmiseks. Meetod sobib kasutamiseks armeerimiseks ja struktuurseks stabiliseerimiseks mõõdukalt tugeva aluspinnase/aluskihi puhul ($c_u < 150$ kPa). Meetod on rakendatav nii geotekstiili kui ka geovõrgu puhul ning võimaldab teha arvutusi ka ilma geosünteedita.

Põhivalemi (1) kasutamisel geovõrgu arvutuseks on vajalik kalibreerimine.

$$h = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{1 + 0.204[R_E - 1]} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\left(\frac{s}{f_s}\right) \left[1 - 0.9 \exp\left(-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right)\right] N_c f_c CBR_{sg}}} - 1 \right] r \quad (1)$$

Valemis (1) toodud tegur $(0.661 - 1.006J^2)$ on kalibreerimistegur (KT). Antud juhul on kalibreerimiseks kasutatud Tensari kaheteljelisi augustatud ja tõmmatud geovõrke ning omadus, millega kalibreeriti, on võrguava stabiilsusmoodul ($J=0.32$ N-m/deg ja $J=0.65$ N-m/deg). Geosünteedi kasutamata ja geotekstiili puhul $J=0$ ning kalibreerimistegur $KT=0.661$.

Kalibreerimiseks võib kasutada ka muid omadusi ning erinevad tootjad on leidnud vastavad kalibreerimistegurid oma toodangu kohta.

Juhendi *Lisas C* on toodud valemis esinevate tähistete seletus ja arvutusnäide.

7. Geosünteedi valiku põhimõtted

Peatükis kirjeldatakse geosünteedi valiku põhimõtteid ja selgitatakse, kuidas kasutada arvutustes määratud omadusi ehk normsuurusi ning vähendavaid tegureid. Peatüki lõpus on toodud erijuhised nii geotekstiilide kui ka geovõrkude kohta.

Kui geosünteedi kasutamine on vastavalt pt 5 toodud kriteeriumitele põhjendatud, selgitatakse järgmise sammuna välja, missugused omadused peavad geosünteedil nõuetekohaseks toimimiseks olema. See sõltub funktsioonist, mida geosünteed hakkab täitma, ja tingimustest, milles geosünteed asub.

Arvestada tuleb, et geosünteedi vajadus või nõuded geosünteedile võivad ajas muutuda. Näiteks on teede puhul tavaline, et suurimad pinged mõjuvad geosünteedile paigalduse ja ehituse ajal [6]. Sel ajal paikneb geosünteedil suhteliselt õhuke kiht täitematerjali, millel sõidetakse ning mida tihendatakse. Hilisem, eksploatatsiooniaegne koormus, kui geosünteed paikneb juba katendi või muude kihtide all, võib olla ehitusaegsest oluliselt väiksem.

Paigaldamise ja kasutuse käigus võivad geosünteedi omadused halveneda. Paigaldusest tulenevat ja eksploatatsiooni käigus tekkivat omaduste halvenemist ning ka omaduste pikaajalist degradatsiooni arvestatakse projektis arvutuste tegemisel vähendavate tegurite sisse viimisega tootja poolt deklareeritud omadustele. Kui arvutused vähendatud omaduste väärtustega rahuldavad projekti vajadusi, sobib kontrollitud geosünteed kasutamiseks.

Nõuded geosünteedide omadustele esitakse tootja poolt deklareeritud (määratud) omadustele esitatud nõuetena, arvestades vähendavaid tegureid. Näiteks kui deklareeritud 100 kN/m

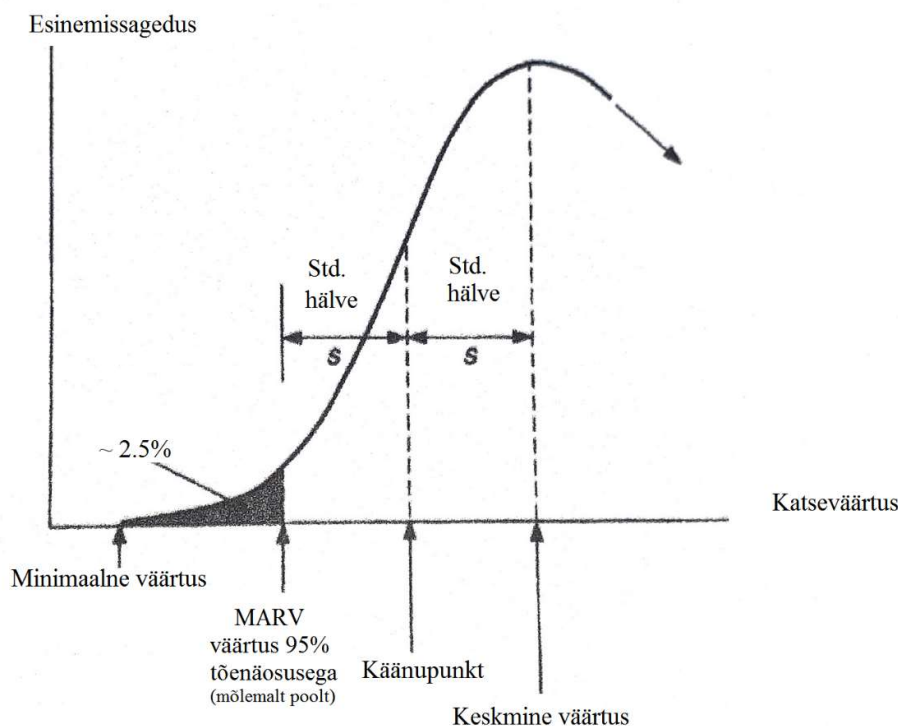
tõmbetugevus on vähendavate tegurite sisseviimisel vähendatud väärtuseni 45 kN/m ning see on piisav vajaliku efekti saavutamiseks, siis nõue määratud omadusele on vähemalt 100 kN/m.

Geosünteedide omaduste väärtusi ja vähendavaid tegureid on käsitletud peatükkides 6.1...6.3. Peatükkides 6.4...6.5 on antud mõningaid täpsustavaid juhiseid erinevat tüüpi geosünteedide valikuks.

7.1 MÄÄRATUD OMADUSED (NORMSUURUSED) JA ARVUTUSSUURUSED

Tootja poolt antud või laboris määratud omaduste väärtusi käsitletakse **määratud omadustena** (Omadus_{määratud}) ning need kirjeldavad geosünteedi enne selle kasutust. Tuginedes määratud omadustele, valitakse konkreetsesse olukorda sobiv geosünteed.

Tootja dokumentides on määratud omadused enamasti esitatud normsuurusena. Normsuurus on omaduse väärtus tõenäosusega 95%, sisuliselt MARV (*minimum-average-roll-value*), mis leitakse teatud materjali koguse (*lot*) kohta. MARV on testitud rullide keskmiste minimaalne väärtus. Geosünteedi omaduste statistilised näitajad on toodud *Joonisel 6*.



Joonis 6. Geosünteedi omaduste statistilised väärtused, [1] järgi.

Siiski võivad tootja dokumentides toodud parameetrid olla ka muu sisuga (näiteks keskmised väärtused). Kui tootjadokumentidest täpselt ei selgu, mida esitatud parameetrid tähendavad, tuleb see välja uurida. See on eriti oluline, kui geosünteedi omadusi kontrollitakse laboris, sest muidu ei ole võimalik väärtusi korrektselt võrrelda.

Geosünteedi omadused paigalduse ajal ja eksploatatsiooni käigus aja jooksul muutuvad. Geosünteedi omaduste halvenemist paigalduse ja kasutusea jooksul kompenseeritakse, rakendades vähendavaid tegureid määratud omaduste normsuurustele või muu sisuga keskväärtustele.

Vähendavate tegurite suurus tuletatakse tootja andmetest, tehnilistest dokumentidest, määratakse laboris või kohapealsete katsete kaudu. Vähendavad tegurid rakendatakse kriitiliste omaduste suhtes vastavalt alljärgnevale valemile:

$$Omadus_{nõutav} = Omadus_{määratud} / A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_i,$$

kus $A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_i$ on vähendavad tegurid (paigaldus, pikaajaline roome, keemiline lagunemine jne).

Vähendavate teguritega läbi jagatud omaduste väärtuseid nimetatakse **arvutussuurusteks**. Geotehnilised arvutused tehakse arvutussuuruseid kasutades.

7.2 PAIGALDUSVASTUPIDAVUS JA VÄHENDAVAD TEGURID

Paigaldusvastupidavus näitab geosünteedi võimet taluda paigaldusest ja ehitusest tulenevaid pingeid oma omadusi võimalikult hästi säilitades. Geosünteedide paigaldamisel kallatakse enamasti jämepeurdne materjal otse geosünteedi pinnale. Mehhanismidega laotamine, peal sõitmine ja täitematerjali tihendamine võib tekitada geosünteedi hõõrdumist, auke ja rebendeid, põhjustada võrgu kraapimist või murdumist. Paigalduskahjustusena käsitletakse ka geosünteedi tehtud tehnilisi avasid ning paigaldusaegset otsest päikesekiirgust.

Geosünteedide kahjustumist paigalduse käigus arvestatakse vähendusteguritega, mis rakendatakse geosünteedi kriitilisse omadusse, milleks enamasti on geosünteedi tugevus. Vähendavaid tegureid ei kasutata, kui geosünteedi tugevus ei ole funktsiooni toimimiseks kriitiline parameeter, näiteks geotekstiilide kasutamine ainult eraldamiseks või filtreerimiseks.

Vähendavad tegurid määratakse katseliselt või tuginetakse kirjanduses (normides) toodule. Paigaldusest tulenev kahjustumine sõltub väga suurel määral paigalduse kvaliteedist, täitematerjalist, kasutatavast tehnikast, aluse ettevalmistusest jne. Selle tõttu tuleb suuremate projektide puhul töömeetodite sobivus, geosünteedi kahjustuste iseloom ning vajadusel ühendusõmbluste tugevus määrata katseväljakul ning vähendavad tegurid tuletada katsetulemuste põhjal.

Paigalduseaegne otsene päikesekiirgus halvendab geosünteedide omadusi, eriti mõjutab see geotekstiilide omadusi [1]. Üldreeglina tuleb geosünteedid katta nii kiiresti kui võimalik, järgida tuleb tootja poolt antud juhiseid. Vastavalt AASHTO M288 nõuetele tuleb geotekstiil katta 14 päeva jooksul. Pikaajalisel eksponeerimisel tuleb selgitada päikesekiirguse mõju ning seda eraldi arvestada.

Laboris testitakse geosünteedide vastupidavust paigaldusele järgmiste katsetega: vastupanu löögile (EN ISO 13433), paigaldamisel tekkivate kahjustuste simuleerimine (ISO 10722), vastupanu augustamisele (EN ISO 12236), vastupanu UV-kiirgusele (EN 12224), ühendusõmbluste tugevus (ISO 10321).

Kui paigaldusest tulenevaid vähendavaid tegureid katsetega ei määrata, tuleb kasutada normides või kirjanduses toodud väärtusi. Kirjanduse andmetel on geotekstiilide puhul paigaldusest tulenev vähendava tegur enamasti 1.1...2.5 [1]. EBGeo [5] järgi on vähendustegur $A_1=1.5$, kui geotekstiilil kasutatakse peeneteralist materjali, ümardatud teradega jäme purdmaterjali korral $A_1=2$, ümardamata materjali puhul nõutakse kohapealseid katsetusi.

Näited vähendavatest teguritest Koerner (2012) [1] järgi on toodud *Tabelis 4* (geotekstiilid) ja *Tabelis 5* (geovõrgud).

Tabel 4. Geotekstiilide tugevust vähendavad tegurid [1] järgi.

Kasutusala	Vähendavad tegurid paigaldusel
Eraldamine	1.1...2.5
Katteta teed	1.1...2.0
Tammid	1.1...2.0

Tabel 5. Geovõrkude tugevust vähendavad tegurid [1] järgi.

Kasutusala	Vähendavad tegurid paigaldusel
Kattega teed	1.2...1.5
Katteta teed	1.1...1.6
Tammid	1.1...1.4

7.3 PIKAAJALINE VASTUPIDAVUS (KESTVUS)

Geosünteedi kestvust tuleb arvestada pikaajaliste lahenduste puhul. Geosünteedi mehaaniline kahjustumine eksploatatsiooni käigus võib toimuda pikaajalise roome (venimine pideval koormusel), pingepurunemise, hõõrdumise, ummistumise jm tulemusel.

Geosünteedi lagunemine (degradeerumine) seisneb muutustes molekulaarsel tasandil võrreldes just toodetuga - polümeeri ahelate katkemine, nendevaheliste sidemete purunemine, komponentide eraldumine jm. Lagunemist soodustavad faktorid on UV-kiirgus, temperatuur (kuum-külm) ja selle muutused, oksüdeerumine, hüdroolüüs (keemiliste sidemete lõustumine vee toimel), kemikaalide mõju, bioloogiline lagunemine jm.

Vähendavad tegurid peavad selguma tootja andmetest või laborikatsetest. Tallinna Tehnikaülikoolis on teedeehituse jaoks välja töötatud kohalikke olusid arvestav katsetamismeetod geosünteedide pikaajalise vastupidavuse katsetamiseks:

- Geosünteedide kiirendatud keemilise vanandamise protseduur
- Geosünteedide roomekäitumise hindamise protseduur
- Geosünteedide temperatuuri mõju hindamise protseduur

- Protseduur geosünteedide roomekäitumise hindamiseks kombineerituna keemilise vanandamisega.

Kui geosünteedide pikaajalist vastupidavust ei testita, tuleb kasutada alljärgnevates tabelites (*Tabel 6 ja 7*) toodud vähendavate tegurite väärtusi.

Tabel 6. Geotekstiilide tugevust vähendavad tegurid [1] järgi.

Kasutusala	Vähendavad tegurid	
	Pikaajaline roome	Keemiline/bioloogiline lagunemine
Eraldamine	1.5...2.5	1.0...1.5
Katteta teed	1.5...2.5	1.0...1.5
Tammid	2.0...3.5	1.0...1.5

Tabel 7. Geovõrkude tugevust vähendavad tegurid [1] järgi.

Kasutusala	Vähendavad tegurid	
	Pikaajaline roome	Keemiline/bioloogiline lagunemine
Kattega teed	1.5...2.5	1.1...1.7
Katteta teed	1.5...2.5	1.0...1.6
Tammid	2.0...3.0	1.1...1.5

7.4 JUHISEID GEOTEKSTIILI VALIKUKS

Armeerimise ja struktuurse stabiliseerimise puhul on geotekstiili kriitiliseks omaduseks tõmbetugevus (määratakse vastavalt ISO 10319:2015), millele rakendatakse vähendavad tegurid ning seatakse nõuded. Sobiva tõmbetugevuse saab leida, kasutades Giroud ja Noiray analüütilist meetodit (pt 6.2.1 ja *Lisa A*) või leida sobiva geotekstiili, kasutades tootjate arvutusprogramme. Tootjameetodite puhul tuleb täpsustada, kas ja kuidas on kasutatud vähendavaid tegureid. Kui vähendavaid tegureid on metoodikas arvestatud või nõ paigalduskahjud avalduvad juba tootja katsetuste tulemustes, ei ole vaja vähendavaid tegureid geotekstiili omadustesse enam rakendada.

Filtreeriva geotekstiili puhul on kriitilised omadused poori suurus (O_{90} või O_{95}) ning veeläbilaskvus (risti pinnaga), mis on määratud vastavalt standarditele ISO 12956 ja ISO 10776, 11058. Nõuded filtreerivale geotekstiilile sõltuvad eraldatavate kihtide terasuurusest ja leitakse vastavalt metoodikale, mis on toodud pt 7.6.

Isegi kui tõmbetugevus ei ole nõ kriitiline parameeter (näiteks kui geotekstiili funktsioon on filtreerimine või eraldamine), peab kasutatav geotekstiil suutma vastu võtta paigaldamisest tuleneva koormuse, seega peab geosünteedil olema teatud baastugevus. Ka juhtudel, kui paigaldusest tulenev koormus on suurem kasutusajal tekkivast koormusest, tuleb geosünteedi valikul lähtuda ehitusaegsetest tingimustest ning rakendada vastavaid vähendavaid

tegereid (pt 7.2). Sellisteks juhtudel võib kasutada tüüpjuhised (GeoNorSpec), milles geotekstiilid jaotatakse vastavalt omadustele klassidesse ning sätestatakse kasutus sõltuvalt aluspinnase tugevusest, ehitusaegsest koormusest ja täitekihi terasuurusest.

Kui geotekstiili kasutatakse pikaajalise lahendusena, tuleb arvestada geotekstiili omaduste halvenemisega (vt Lisa E). Geotekstiili omaduste halvenemine viiakse kriitilistesse omadustesse sisse vähendavate tegurite kaudu (pt 7.3). Lühiajaliste lahenduste puhul pikaajalist vastupidavust arvestada pole vaja.

7.5 JUHISEID GEOVÕRGU VALIKUKS

Geovõrgu kasutamisel toimib lisaks tõmbetugevusele ka nõ lukustusmehhanism, mille käigus täitematerjali terad lukustuvad võrgusilmadesse (struktuurne stabiliseerimine pt 4.6). Kui tegemist on väikeste deformatsioonidega, ei ole geovõrgu traditsioonilised indeksomaduste väärtused (tõmbetugevus, E-moodul) kriitilise tähtsusega. Väikeste deformatsioonide korral mõjutavad geovõrgu toimimist peamiselt võrguava parameetrid ja stabiilsus. Võrguava stabiilsust iseloomustab võrguava stabiilsusmoodul, mida kasutatakse Giroud-Han meetodi (pt 6.2.3) puhul täitematerjali kokkuhoiu arvutuseks.

Võrguava suurus valitakse vastavalt kandva kihi terasuurusele, nii et purdmaterjali osakesed paiknevad tihedasti võrguavades ja tekib ühtne tugev struktuur. Nõuded võrguga kontaktis oleva täitematerjali terasuurusele on toodud Tabelis 8.

Tabel 8. Võrguga kontaktis oleva täitematerjali terasuurus [11] järgi.

Võrgu ava	Tingimus
Minimaalne mõõt	$\geq D_{50}$, kuid mitte väiksem kui 25 mm
Maksimaalne mõõt	$\leq 2 \cdot D_{85}$, kuid mitte suurem kui 75 mm

D_{50} on täitematerjali keskmine terasuurus,

D_{85} on täitematerjali terasuurus, millest 85% on väiksem.

Koerner (2012) järgi [1] on nihkepinge ülekanne võrgule kõige efektiivsem siis, kui geovõrgu minimaalne ava suurus on $>3.5 \cdot D_{50}$ (D_{50} on täitematerjali keskmine terasuurus).

Paigalduskahjusid ja geovõrgu omaduste halvenemist pikaajasel kasutusel arvestatakse vähendavate tegurite kaudu (pt 7.2, 7.3), mis viiakse sisse vastavasse kriitilisse omadusse (tõmbetugevus, võrguava stabiilsusmoodul vm).

7.6 JUHISEID FILTREERIVA GEOSÜNTEEDI VALIKUKS

Kui geotekstiili puhul on üheks funktsiooniks filtreerimine, peab geotekstiil laskma läbi vett, takistades samal ajal pinnaseosakeste liikumist. Filtreerimiseks soovitatakse üldiselt kasutada kudumata geotekstiile, kuna need on paremate tõkestavate omadustega [7].

Nõuded geotekstiilile on järgmised:

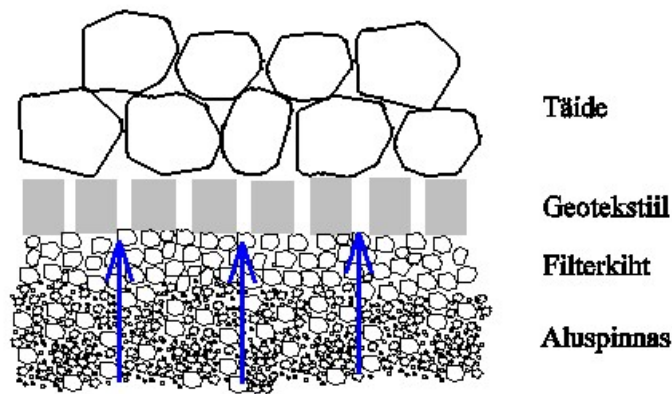
- 1) peab tõkestama pinnaseosakeste liikumist,

- 2) peab laskma küllaldaselt vett läbi, et geotekstiili taga ei tekiks hüdrostaatilist survet,
- 3) ei tohi kergesti ummistuda,
- 4) peab olema vastupidav paigaldusele,
- 5) pikaajalise kasutuse puhul vastupidav ummistumisele ja keskkonnamõjutustele.

7.6.1 Peente osakeste tõkestamine

Geosünteedi filtreeriv efekt seisneb filterkihi tekkes geosünteedi ja aluspinnase vahele. Peenemad osakesed uhutakse läbi geotekstiili ning jämedamatest osakestest moodustub aja jooksul filterkiht, mis hiljem takistab peenete osakeste liikumist läbi geotekstiili täitekihti. Filterkihi teke on võimalik, kui geotekstiili pooride suurus on väiksem kui külgneva pinnase suurimate osakeste läbimõõt.

Nähtust illustreerib Joonis 7.



Joonis 7. Filterkiht aluspinnasel. Siniste nooltega on näidatud vee liikumissuund.

Tavatingimustes võib geotekstiili sobivust kontrollida tingimusega [4]:

$$O_{95} < B \cdot d_{85(pinnas)}$$

O_{95} on suurus, millega võrdse läbimõõduga pinnaseosakestest 95% geotekstiili ei läbi.

d_{85} on terasuurus, millest 85% aluspinnase osakestest on väiksemad.

B on koefitsient, mis sõltub pinnase tüübist, geotekstiili tüübist, vee voolamise iseloomust.

Koefitsiendi B suuruseks on $B=0.5...2$ [4]. Koerner (2012) [1] soovib püsiva voolu tingimustes kasutada $B=2...3$. Dünaamilise voolu tingimustes või olukorras, kui geotekstiil ei ole tihedalt pinnasega seotud, võib pinnas geotekstiili all liikuda ning filterkihti ei pruugi moodustada. Kui tõkestamine on kriitiline omadus, tuleks sel juhul kasutada väärtust $B=0.5$ [4]. Ka teekonstruksiooni paigaldatud geotekstiil on dünaamilise voolu tingimustes, kui ratta surve tekitab peeneteralises pinnases suure poorirõhu, mille toimel vesi liigub lasuvasse kihti. Millist koefitsienti kasutada, tuleb igal konkreetsel juhul otsustada olenevalt sellest, kui kriitiline osakeste tõkestamine on.

Kui saadaolevad geotekstiilid ei vasta ülaltoodud nõudele, tuleb geotekstiili ja aluspinnase vahele projekteerida vahekiht sobiva terasuurusega pinnasest nii, et pt 5.3.1 Tabelis 2 toodud tingimused oleks täidetud.

7.6.2 Vee läbilaskvus

Veeläbilaskvuse kohta kehtib üldiselt nõue, et geotekstiili veejuhtivus peab olema suurem kui pinnasel, millest veevool lähtub:

$$k_{\text{geotekstiil}} > k_{\text{pinnas}}$$

Geotekstiili veejuhtivus leitakse veeläbilaskvuse korrutamisel geotekstiili paksusega:

$$k_{\text{geotekstiil}} = \psi \cdot t, \text{ kus}$$

k_{pinnas} on pinnase veejuhtivus (m/s),

$k_{\text{geotekstiil}}$ on pinnase veejuhtivus (m/s),

ψ geotekstiili veeläbilaskvus (s^{-1}).

Aja jooksul võib geotekstiil ummistuda ning veeläbilaskvus selle tõttu oluliselt väheneda. Geotekstiili ummistumine toimub siis, kui geotekstiili tunginud pinnaseosakesed jäävad sinna pidama. Ummistumise vältimiseks peab olema täidetud nõue [4]:

$$O_{95} \geq 3 \cdot d_{15(\text{pinnas})}, \text{ kus}$$

O_{95} on suurus, millega võrdse läbimõõduga pinnaseosakestest 95% geotekstiili ei läbi.

d_{15} on terasuurus, millest 15% aluspinnase osakestest on väiksemad.

Ummistumine on tõenäoline möllpinnaste, väga ühtlaseteraliste peenpinnaste, mitmesuguste ühtlaseteraliste tootmisjääkide (peensõelmed) vm puhul. Sellisel juhul tuleb kasutada kudumata geotekstiili, mille poorsus on 50% ja rohkem. Lisaks mehaanilisele ummistumisele, võivad geotekstiili filtreerivad omadused halveneda ka pikaajalise roome, keemilise või bioloogilise ummistumise, peentest osakestest või väljasettinud karbonaatidest tõkestava kihi tekkimisel geotekstiili pinnale vm tõttu.

Tabelis 9 on toodud vähendavad tegurid, mille suurus tee konstruktsiooni paigaldatud geotekstiili jaoks on tuletatud tuginedes Koerner (2012) [1]. Vähendavaid tegureid on võimalik määrata ka laboris spetsiaalsete katsetega.

Tabel 9. Veeläbilaskvust vähendavad tegurid.

Faktor	Vähendav tegur
Ummistumine	2.0...4.0
Pooride vähenemine roomel	1.5...2.0
Võõra materjali sissetung geotekstiili	1.0...1.2
Keemiline ummistumine	1.0...1.5
Bioloogiline ummistumine	1.2...1.5

8. Tehniline spetsifikatsioon

Tehniline spetsifikatsioon on dokument, milles antakse nõuded geosünteedi omadustele, katsetustele, paigaldusele, geosünteediga koos kasutatavatele materjalidele, kontrollile, järelevalvele; samuti märgistusele ja vastavusele, kui see on vajalik.

1. Geosünteedi funktsioon või funktsioonid peavad olema selgelt välja toodud. Lähtuvalt funktsioonist ja konkreetsetest tingimustest antakse geosünteedi tüüp-alamtüüp, valmistusviis, vajadusel ka polümeerkoostis.
2. Nõuded omadustele antakse nõutava väärtusena, mis tähendab, et vähendavad tegurid on juba sisse viidud. Konkreetset väärtust sõltuvad projektist ja tingimustest ning need tuleb projekteerijal leida, kasutades tabelväärtusi või praktilist kogemust.
3. Geosünteedid peavad omama CE-märgistust, mis näitab, et toode vastab Euroopa Liidu vastavatele tootele kohaldatavate direktiivide nõuetele (harmoniseeritud tootestandardid). Iga rull peab olema märgistatud vastavalt EVS-EN ISO 10320 nõuetele, kus on näidatud tootja, toote tüüp ja nimetus, sertifikaadi number, mõõdud, kaal, rulli tootjakood.
4. Geosünteedide tähised joonistel (vastavalt IGS - International Geosynthetics Society soovitusel) ja lühendid on toodud *Tabelis 10*.

Tabel 10. Geosünteedide tähistamine joonistel (vastavalt IGS) ja lühendid

Geosünteed	Tähis joonisel	Lühend
Geosünteed		GS
Geotekstiil	— — — — —	GT
Geovõrk	—●—●—●—●—	GV
Dreeniv geovõrk	× × × × × × × ×	GVD
Geokomposiit	Vastavalt koostisosade tähistele	GK

5. Tehnilises spetsifikatsioonis antakse üldised nõuded geosünteedi käsitlemisele, transpordile ja ladustamisele.
6. Paigalduse jaoks tuleb anda minimaalselt nõuded alljärgnevale:
 - aluspinna iseloom (tasasus),
 - paigalduse suund,
 - ülekate,
 - ühenduste vajadus ja nende tegemise protseduur,
 - paigaldusprotsess,
 - kahjustunud kohtade parandamise või asendamise kord,
 - täitekihi ehituse tingimused (täite koostis, paksus, mehhanismid, tihendamine jm).

7. Geosünteedi ülekate sõltub peamiselt aluskihi tugevusest. Üldkasutatavad ülekatted geotekstiilide puhul on toodud *Tabelis 11* ja geovõrkude puhul *Tabelis 12*. Parandatud kohtade ülekate peab igast servast vastama vähemalt *Tabelite 11 ja 12* nõuetele.

Tabel 11. Nõuded geotekstiilide ülekatele, [4] järgi.

Pinnase dreenimata nihketugevus c_u , kPa	Minimaalne ülekate (geotekstiil)
> 90	0.30...0.45 m
30...90	0.60...1.00 m
15...30	1 m või õmblus
<15	õmblus
Rulli otsad	1 m või õmblus

Tabel 12. Nõuded geovõrkude ülekatele, [11] järgi

Pinnase dreenimata nihketugevus c_u , kPa	Minimaalne ülekate (geovõrk)
> 60	0.30...0.45 m
30...60	0.60...0.90 m
15...30	0.90 m
<15	Mehaaniline ühendus

8. Tehnilises spetsifikatsioonis antakse geosünteedi nõuetele vastavuse määramise metoodika, mille hulgas peavad sisalduma:
- kohapeal teostatavad mõõtmised,
 - vajalikud laborikatsed, nende arv, metoodika või viide vastavale standardile,
 - välikatsed ja nende läbiviimise metoodika või viide vastavale standardile,
 - määratavate näitajate hälbed.

Lähtuda tuleb Soome Transpordi Infrastruktuuri Ameti (vayla.fi) juhendist (2/2021):

[Geosyntteettien laadunvalvonta väylähankkeissa](#)

9. Tööde teostamise kvaliteedinõuded ja kontroll ei ole tehnilise spetsifikatsiooni osa, need formuleeritakse kvaliteedi tagamise ja kontrolli plaanis.

LISA A Giroud Noiray analüütiline meetod [14]

Meetod on algselt ilmunud publikatsioonis Giroud, J.P. ja Noiray, L., "Design of Geotextile Reinforced Unpaved Roads," Jour. Geotech. Eng.Div., ASCE, Vol107, No GT, 1981. Alljärgnev kirjeldus on koostatud väljaande Robert M.Koerner., *Designing with geosynthetics 6th edition Vol 1., 2012 (Rev. 2016)* põhjal.

Meetod põhineb ratta koormuse jaotumisel kandvas kihis.

Rehvi koormusest tekkinud surve (p_0) aluspinnale geotekstiili kasutamata avaldub järgmiselt:

$$p_o = \frac{P}{2(B + 2h_o \tan \alpha_o)(L + 2h_o \tan \alpha_o)} + \gamma h_o \quad (1)$$

Geotekstiili kasutades on surve (p) võrdne:

$$p = \frac{P}{2(B + 2h \tan \alpha)(L + 2h \tan \alpha)} + \gamma h \quad (2)$$

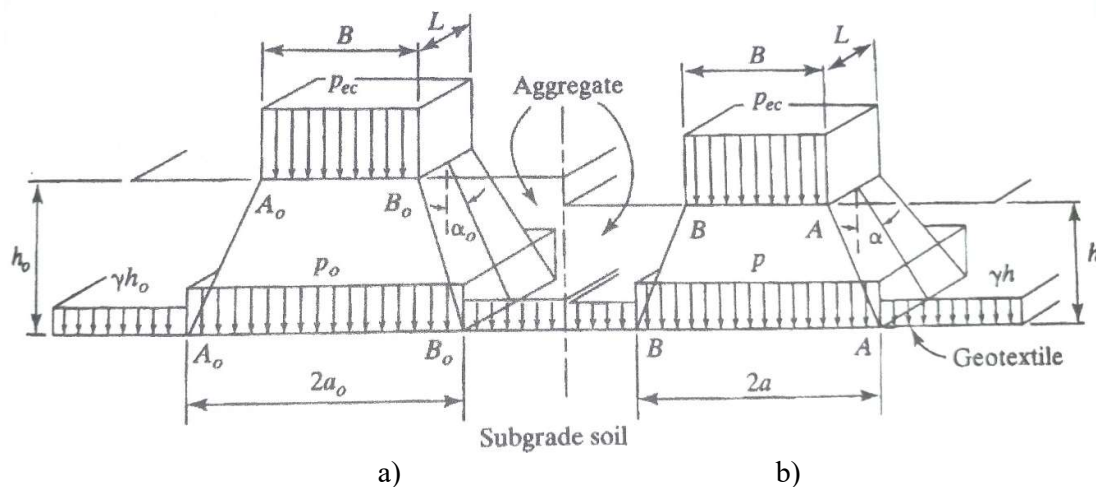
P on teljekoormus,

γ on täite (kandva kihi) mahukaal,

h_o on täitekihi (kandva kihi) paksus geotekstiili kasutamata,

h on täitekihi (kandva kihi) paksus geotekstiili kasutades,

B, L, a on parameetrid Jooniselt A.1.



Joonis A.1 Pinge jaotus kandvas kihis. Giroud ja Noiray järgi a) ilma geotekstiilita, b) geotekstiiliga. Väljavõte [1].

Geotekstiili efekt põhineb eeldusel, et ilma geotekstiilita on maksimaalne surve (p_0), mida pinnas vastu võtab, võrdne pinnase elastsuspiiriga:

$$p_0 = \pi c + \gamma h_o \quad (3)$$

Kasutades geotekstiili, vastab maksimaalne surve (p^*), mida pinnas vastu võtab, pinnase piirkandevõimele:

$$p^* = (\pi + 2)c + \gamma h \quad (4), \text{ kusjuures } p^* = p - p_g \quad (5)$$

c on pinnase nidusus (dreenimata tingimustel),
 p on surve pinnasele kasutades geotekstiili,
 p_g on funktsioon geotekstiilis tekkivast tõmbest.

$$p_g = \frac{E\varepsilon}{a\sqrt{1 + (a/2S)^2}} \quad (6)$$

E on geotekstiili E-moodul,
 ε on suhteline deformatsioon,
 a on geomeetriline omadus (vt *Joonis A.1*),
 S on aluspinnase vajum ratta all.

Kombineerides valemeid (1) ja (3), saab kandva kihi paksuse ilma geosünteedita leida valemiga:

$$c = \frac{P}{2\pi \left(\sqrt{P/p_c + 2h_o \tan \alpha_o} \right) \left(\sqrt{P/2p_c + 2h_o \tan \alpha_o} \right)} \quad (7)$$

Kombineerides valemeid (2), (4), (5) ja (6), saab kandva kihi paksuse erinevate geotekstiilide kasutamisel leida valemiga :

$$(\pi + 2)c = \frac{P}{2(B + 2h \tan \alpha)(L + 2h \tan \alpha)} + \frac{E\varepsilon}{a\sqrt{1 + (a/2S)^2}} \quad (8)$$

Algset meetodit on hiljem täiendatud ning koostatud nomogramme ja etalonkõveraaid, millest üks näide on toodud *Joonis A.2*. Etalonkõverate järgi saab vastavalt geotekstiili omadustele, ülesõitude arvule, roopa sügavusele ja aluspinnase tugevusele leida täitekihi paksuse ilma geotekstiilita (h'_0) ja kihipaksuse vähenemise (Δh) kasutades geotekstiili.

Geotekstiili toimimine põhineb membraaniefektil, mis tekib koormuse, geotekstiili ja aluspinnase koostöös. Membraaniefekti rakendumiseks peab aluspinnas teatud määral deformeeruma, seega sobib meetod kasutamiseks juhul, kui tee pinnal on lubatud teatud sügavusega roopad.

NÄIDE 1. Näites on kasutatud nomogrammi väljaandest [1].

Kasutades nomogrammi *Joonisel A.2*, leida kandva kihi paksus ilma geotekstiilita ja kasutades geotekstiili.

Algandmed:

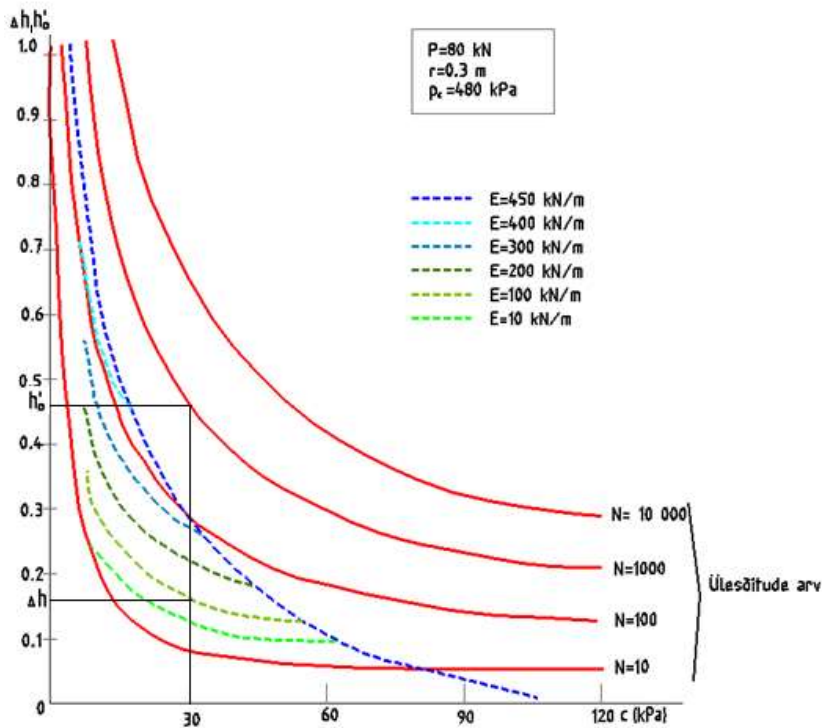
Ülesõitude arv $N=1000$

Teljekoormus $P=80$ kN

Rehvirõhk $p_c=480$ kPa

Aluspinnase dreanimata nihketugevus $c_u=30$ kPa

Geotekstiili moodul (E-moodul) $E = 100 \text{ kN/m}$
 Roopa sügavus $r = 0.3 \text{ m}$



Joonis A.2. Etalonkõverad [1] järgi, kohandatud.

Tähised joonisel: h'_0 - kandva kihi paksus ilma geotekstiilita (m)

Δh - kandva kihi paksuse vähenemine geotekstiili kasutades (m)

P - teljekoormus (kN)

E - geotekstiili moodul (kN/m)

N - telje ülesõitude arv

c - aluspinnase dreanimata nihketugevus (kPa)

p_c - rehvirõhk (kPa)

r - roopa sügavus

Vastavalt Joonisele A.2 vastab ülesõitude arvule $N=1000$ ja aluspinnase tugevusele ($c_u = 30 \text{ kPa}$) y-teljel kandva kihi paksus $h'_0 = 0.47 \text{ m}$.

Kasutades geotekstiili mooduliga $E=100 \text{ kN/m}$, vastab aluspinnase tugevusele ($c_u = 30 \text{ kPa}$) y-teljel kandva kihi paksuse vähenemine $\Delta h = 0.17 \text{ m}$ ehk kandva kihi paksuseks geotekstiili kasutades on $h'_0 - \Delta h = 0.47 \text{ m} - 0.17 \text{ m} = 0.30 \text{ m}$.

LISA B FHWA HI-95-038 [15] kirjeldatud meetod

Meetod on välja töötatud geotekstiilide jaoks, lähtudes pinnasemehaanika printsiipidest ja see on kalibreeritud arvukate testidega. Meetod on algselt ilmunud publikatsioonis: *Steward, J., Williamson, R. ja Mohney, J., Guidelines for Use of Fabrics in Construction and Maintenance of Low-Volume Roads, USDA, Forest Service, Portland, OR, 1977. Report No. FHWA-TS-78-205.* Käesolevalt on meetodit refereeritud väljaande [15] järgi.

Erinevalt Giroud Noiray meetodist geotekstiili enda omadused arvutustulemust ei mõjuta ning kihipaksuste arvutus ja geosünteedi valik on eraldatud. Nõutavad geotekstiili omadused on sätestatud vastavalt geosünteedi kasutusfunktsioonile, rajamistingimustele jms (AASHTO M288, GeoNorSpec).

Meetodit saab rakendada järgmistes tingimustes:

- aluspinnase dreenimata nihketugevus (c_u) on <90 kPa (CBR <3),
- täitekiht koosneb sidumata materjalist ning on tihendatud CBR=80,
- ülesõitude arv $<10\,000$,
- geosünteedi paigaldusvastupidavus vastab paigaldustingimustele.

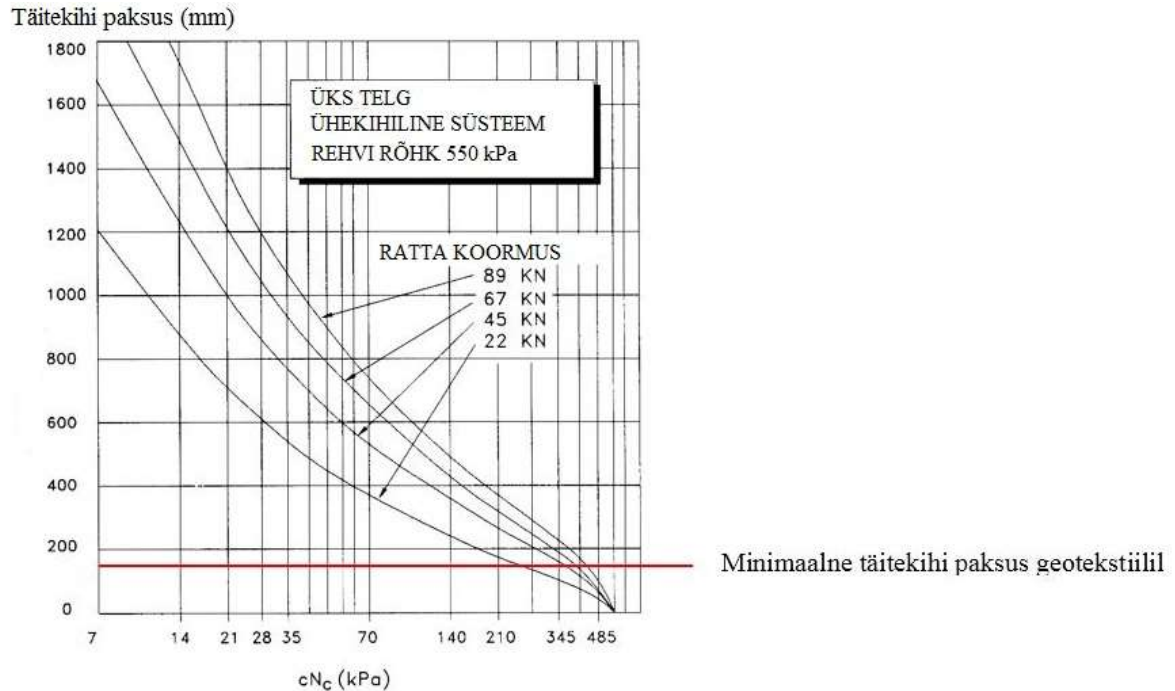
Kihipaksuste arvutus põhineb labori- ja välikatsetes andmete järgi tuletatud kandevõimeteguritel (N_c). Kandevõimetegurid iseloomustavad olukorda nii ilma geotekstiilita kui ka geotekstiili kasutades. Kandevõimetegurid on toodud alljärgnevas Tabelis C.1.

Tabel C.1. Kandevõimetegurid.

Tingimus	Roopa sügavus (mm)	Ülesõitude arv (80 kN teljekoormus)	Kandevõime tegur, N_c
Ilma geotekstiilita	<50	>1000	2.8
	>100	<100	3.3
Geotekstiiliga	<50	>1000	5.0
	>100	<100	6.0

Kandevõime teguri korrutamisel aluspinnase dreenimata nihetugevusega saadakse koormustase ($c_u \cdot N_c$) geotekstiili rakendamisel ning ilma selleta. Kihipaksuste leidmiseks erinevates tingimustes on koostatud vastavad nomogrammid, millelt loetakse täitekihi vajalik paksus vastavalt koormustasemele. Nomogramm täitekihi paksuse leidmiseks rehvirõhu 550 kPa juures on näidatud Joonisel C.1.

Jooniselt on näha, et geotekstiili efekt väheneb aluspinnase tugevuse kasvades. Aluspinnase dreenimata nihketugevusel 80–90 kPa ning ratta koormusel alla 40 kPa on geosünteedi efekt marginaalne, kuna soovituslik minimaalne täitekihi paksus ratta ja geotekstiili vahel peaks olema vähemalt 150 mm (Joonis C.1).



Joonis C.1. Nomogramm kandva kihi paksuse määramiseks kandevõimeteguri kaudu. Väljavõte [15], täiendatud.

NÄIDE 2

Algandmed:

Aluspinnase dreenimata nihketugevus $c_u = 30$ kPa

Ülesõitude arv $N = 5000$

Teljekoormus 90 kN

Rehvirõhk 550 kPa

Lubatud roopa sügavus 150 mm

1. Tabelist C.1 leida kandevõimetegurid:

Geotekstiilita:

Lubatud roopa sügavusele 150 mm vastab kandevõimetegur $N_c = 3.3$ ning ülesõitude arvule 5000 (>1000) vastavalt $N_c = 2.8$. Keskmise kandevõimetegur $N_c = 3.05$.

Geotekstiiliga:

Lubatud roopa sügavusele 150 mm vastab kandevõimetegur $N_c = 6.0$ ning ülesõitude arvule 5000 (>1000) vastavalt $N_c = 5.0$. Keskmise kandevõimetegur $N_c = 5.5$.

2. Kandevõimetegurite ja aluspinnase dreenimata nihketugevuse kaudu leida koormustase.

Geotekstiilita: $c_u \cdot N_c = 30 \text{ kPa} \cdot 3.05 = 91.5 \text{ kPa}$

Geotekstiiliga: $c_u \cdot N_c = 30 \text{ kPa} \cdot 5.5 = 165 \text{ kPa}$

3. Nomogrammilt Joonisel C.1 lugeda vastavad kandva kihi paksused:

Geotekstiilita: 475 mm, geotekstiiliga: 325 mm, kokkuhoid 150 mm.

LISA C Giroud-Han meetod (2004)

Meetod on avaldatud publikatsioonis *Giroud, J.P. and Han, J. "Design method for geogrid-reinforced unpaved roads—Part I: theoretical development, Part II: calibration and verification", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(8), 2004.* Ülevaade on antud FHWA NHI-07-092 Geosynthetic Engineering Roadways and Pavement August 2008 [14] põhjal.

Valemi (1) järgi on võimalik arvutada sidumata täitematerjalist koosneva kandva kihi paksust

- ilma geosünteedita
- kasutades geotekstiili,
- kasutades geovõrku.

$$h = \frac{0.868 + \left(0.661 - 1.006J^2\right) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{1 + 0.204[R_E - 1]} \left[\sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\left(\frac{s}{f_s}\right) \left[1 - 0.9 \exp\left(-\left(\frac{r}{h}\right)^2\right)\right] N_c f_c CBR_{sg}}} - 1 \right] r \quad (1)$$

Valemi seletused

- h on kandva kihi (täitekihi) vajalik paksus (m),
 J on geovõrgu ava stabiilsusmoodul (N-m/deg),
 J=0, kui kasutatakse geotekstiili või geosünteedi ei kasutata
 (0.661-1.009J²) on kalibreerimisfaktor, mis peab vastama tingimusele (0.661-1.009J²)>0,
 Valemi kalibreerimine on tehtud Tensari kaheteljeliste augustatud ja tõmmatud geovõrkudega, J=0.32 N-m/deg ja J=0.65 N-m/deg.
- P on ratta koormus (kN)
 N on telje ülesõitude arv
 R_E on kandva kihi ja aluspinnase/aluskihi elastsusmoodulite suhe R_E=E_{kk}/E_{ap}
 E_{kk} on kandva kihi elastsusmoodul MPa
 E_{ap} on aluspinnase või aluskihi elastsusmoodul MPa
 f_s on roopa sügavuse faktor f_s=75 mm
 s on lubatud roopa sügavus (vahemikus 50...100 mm)
 N_c on kandevõimetegur
 N_c =3.14 geosünteedi kasutamata
 N_c =5.14 geotekstiili puhul
 N_c =5.71 geovõrgu puhul
 c_u on drenimata nihketugevus kPa
 r on rehvi kontaktpinna raadius (m)

Meetodi piirangud

Giroud-Han meetodit saab kasutada vaid siis, kui järgnevad tingimused on täidetud:

- Aluspinnas on drenimata tingimustes (sisehõõrdenurk φ=0°ning pinnas ei ole kokkusurutav), 30<c_u<150 kPa

2. Deformatsioon kandva kihi aluspinnal on vahemikus 40...100 mm.
3. Kandev kiht on tihendatud, selle minimaalne paksus on 100 mm.
4. Kandva kihi ja aluspinnase/aluskihi elastsusmoodulite suhe $R_E < 5$.
5. Ülesõitude arv on kuni 10000.
6. Meetodi kalibreerimine on tehtud kahe spetsiifilise võrguga (Tensar, BX1100 ja BX1200), mistõttu tulemused ei pruugi kehtida muude geovõrkude korral.

NÄIDE 3

Kasutades valemit (1) leida konstruktsiooniliste kihtide paksused, kasutades geotekstiili, geovõrku ja ilma geosünteedita.

Algandmed:

Ratta koormus $P=40\text{ kN}$;
Rehvi rõhk $p=550\text{ kPa}$;
Ülesõitude arv $N=10000$;
Kandva kihi elastsusmoodul $E_{kk}=180\text{ MPa}$;
Aluspinnase (savi) drenimata nihketugevus $c_u=30\text{ kPa}$, elastsusmoodul $E_{ap}=10\text{ MPa}$;
Roopa sügavus kandva kihi aluspinnal $=50\text{ mm}$;
Geovõrgu ava stabiilsusmoodul $J=0.37\text{ N-m/deg}$.

Arvutuskäik:

1. Kontrollida tingimuste vastavust meetodi kasutamiseks.

$R_E = E_{kk}/E_{ap} = 180/10 = 18$, tingimus $E_{kk}/E_{ap} < 5$, järelikult tuleb aluspinnasele kandva kihi alla rajada vahekiht, mille elastsusmooduliks võtta 50 kPa .
 $E_{kk}/E_{ap} = 180/50 = 3.6$.

2. Kontrollida peente osakeste „pumpamise“ võimalikkust.

Antud juhul on aluspinnase puhul tegemist saviga, mistõttu pumpamisnähtust ei esine, seega võib kasutada nii geotekstiili kui geovõrku.

3. Kasutades valemit (1) leida vahekihi paksus:
 - a) ilma geosünteedita
 - b) geotekstiiliga
 - c) geovõrguga

Ülesõitude arv vahekihil on $N=100$.

Valemiga $r = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$ leida rehvi kontaktpinna raadius (m), kus

P on ratta koormus (kN),
 p on rehvi rõhk (kPa).

- a) vahekihi paksus ilma geosünteedita ($J=0$, kandevõimetegur $N_c = 3.14$).

Asendades algandmed ja vajalikud parameetrid valemisse, on vahekihi paksuseks $h_o=0.56$ m.

b) vahekihi paksus kasutades geotekstiili ($J=0$, kandevõimetegur $N_c=5.14$).

Asendades algandmed ja vajalikud parameetrid valemisse, on vahekihi paksuseks $h_{gt}=0.38$ m.

c) vahekihi paksus kasutades geovõrku ($J=0.37$, kandevõimetegur $N_c=5.71$).

Asendades algandmed ja vajalikud parameetrid valemisse, on vahekihi paksuseks $h_{gv}=0.32$ m.

Geotekstiili ja geovõrgu kasutamine vähendab täitematerjali kogust. Siiski, kui materjali on vahekihi ehituseks küllaldaselt ja materjali omadused võimaldavad seda muldesse paigutada, siis puudub geosünteedi kasutamiseks vajadus.

4. Kasutades valemit (1) leida kandva kihi paksus vahekihil:

a) Ilma geosünteedita ($J=0$, kandevõimetegur $N_c=3.14$).

Ülesõitude arv $N=10000$

Kandva kihi elastsusmoodul $E_{kk}=180$ MPa,

alumise kihi elastsusmoodul $E_{ap}=50$ MPa, drenimata nihketugevus $c_u=150$ kPa.

Asendades algandmed ja vajalikud parameetrid valemisse, on kandva kihi paksuseks $h_o=0.24$ m.

b) kasutades geotekstiili ($J=0$, kandevõimetegur $N_c=5.14$).

Asendades algandmed ja vajalikud parameetrid valemisse, on kandva kihi arvutatud paksus < 0.1 m ehk valemi kasutuspiirkonnast väljas. Kandva kihi paksuseks tuleb võtta 0.1 m.

c) kasutades geovõrku ($J=0.37$, kandevõimetegur $N_c=5.71$).

Asendades algandmed ja vajalikud parameetrid valemisse, on kandva kihi arvutatud paksus < 0.1 m ehk valemi kasutuspiirkonnast väljas. Kandva kihi paksuseks tuleb võtta 0.1 m.

Arvutus näitab, et kuigi kandva kihi materjali on võimalik märkimisväärselt kokku hoida, ei saa aluskihi suurema tugevusega aluskihi puhul geosünteedi efekti täielikult ära kasutada.

LISA D Geosünteedide keemiline koostis ja struktuur

Koostas: Merit Rikko (TTÜ)

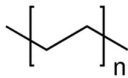
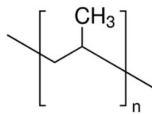
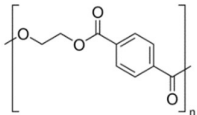
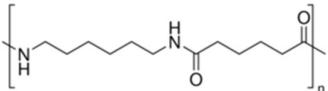
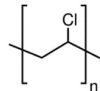
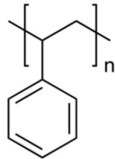
Geosünteedid on enamasti valmistatud homopolümeeridest, mis on ühtlasi ka termoplastid.

Polümeerid koosnevad makromolekulidest, mis omakorda koosnevad paljudest korduvatest ühikutest ehk meeridest, mis on omavahel seotud kovalentsete keemiliste sidemetega ning paiknevad polümeeris teatava korrastatuse alusel. Kui polümeer koosneb ühte tüüpi korduvatest ühikutest, siis nimetatakse teda homopolümeeriks.

Oma struktuuri poolest on polümeerid poolkristallilised ehk osaliselt kristalliinsed ja osaliselt amorfed. Viimaste puhul on polümeerahelad paigutunud juhuslikult ja korrapäratult. Poolkristalliliste polümeeride puhul on ahelad osades piirkondades samuti paigutunud korrapäratult ning mingites piirkondade paigutunud korrapärasesse ruumilisse mustrisse, mida iseloomustab ka kristallilisuse aste. Kristalliline struktuur mõjutab ka polümeeri omadusi, mida suurem on kristallilisuse aste, seda suurem on polümeeri tugevus, jäikus, kõvadus, pehmenemistemperatuur ja keemiline vastupidavus. [Koerner, 2012; Katchy, 2000].

Kõige enam kasutatavad polümeerid ning vastav geosünteedi tüüp on ära toodud *Tabelis 1*.

Tabel D.1. Geosünteedides peamiselt kasutatavad polümeerid ja vastav geosünteedi tüüp.
[Koerner, 2012]

Polümeer	Korduv ühik	Geosünteedi tüüp
Polüetüleen (PE)		Geotekstiil, geovõrk, geovõre, geotoru, geomembraan, geokomposiit
Polüpropüleen (PP)		Geotekstiil, geovõre, geomembraan, geokomposiit
Polüetüleentereftalaat (PET)		Geotekstiil, geovõre
Polüamiid (PA)		Geotekstiil, geovõre, geokomposiit
Polüvinüülkloriid (PVC)		Geomembraan, geokomposiit, geotoru
Polüstüreen (PS)		Geokomposiit, geovaht

Polümeeri konkreetsete omaduste, näiteks mehaaniliste, optiliste, elektriliste või tööaja parandamiseks saab kasutada lisandeid. Geosünteedide puhul on eriti oluline tööea pikkus ning selle pikendamiseks lisatakse antioksüdante, UV stabilisaatoreid, pigmente, metallioonide deaktiveerijaid. [ISO/TS 13434] Tabelis 2 on ära toodud geosünteedides enim kasutatavad polümeeride ja lisandite ligikaudsed kaaluprotsendid.

Tabel D.2. Enamlevinud geosünteedid polümeeri põhiselt ja nende lisandite sisaldus. [Koerner, 2012]

Polümeer	Polümeeri sisaldus, %	Erinevate lisandite sisaldus, %	Tahma/värvi-pigmentide sisaldus, %	Täiteainete sisaldus, %	Plastifikaatori sisaldus, %
Polüetüleen (PE)	95-98	0,5-2	2-3	0	0
Polüpropüleen (PP)	85-96	1-2	2-3	0-13	0
Polüetüleen-terftalaat (PET)	96-98	0,5-1	2-3	0	0
Polüvinüülkloriid (plastifitseeri-mata) (PVC-U)	70-85	2-3	5-10	20-30	0
Polüvinüülkloriid (plastifitseeritud) (PVC-P)	30-40	2-3	5-10	20-30	25-30
Polüamiid (PA)	96-98	0,5-1	2-3	0	0
Polüstüreen (PS)	96-98	0,5-1	2-3	0	0

Allikad:

[Koerner, 2012] - Koerner, R.M., 2012. Designing With Geosynthetics, sixth ed. Xlibris Publ. Co., p. 914.

[Katchy, 2000] Katchy, E.M. (2000), Principles of Polymer Science, 1st ed., Enuhu, Nigeria: El'demak Publishers.

[ISO/TS 13434] - ISO/TS 13434:2008 Geosynthetics -- Guidelines for the assessment of durability

LISA E Geosünteedide keemiline vastupidavus

Koostas: Merit Rikko (TTÜ)

Geosünteedide keemiline vastupidavus sõltub suuresti geosünteedi polümeersest olemusest, millest omakorda sõltub ka vastupidavus erinevatele keskkonnamõjuritele. Tabelis F.1 on ära toodud kolme põhilisema geosünteedides kasutatava polümeeri vastupidavus erinevatele keskkonnamõjuritele.

Kuid lisaks polümeersele olemusele sõltub geosünteedi keemiline vastupidavus järgnevatest asjaoludest [ISO/DTR 18228-1]:

- Keemiliste reaktsioonide kiirus sõltub temperatuurist, mida kõrgem see on, seda kiiremini kulgeb reaktsioon.
- Keemilised reaktsiooni toimuvad enamasti materjali pinnal, seega on paksemad materjalid vastupidavamad kui õhemad.
- Materjali pindala ehk eripinna suurenemine suurendab ka keemiliste reaktsioonide kiirust. See tähendab, et peenikestest kiududest geotekstiilide vastupidavus võib olla väiksem, kui suhteliselt pakse elemente sisaldavate geovõrede oma.
- Reaktsioonid tahkete keemiliste ühenditega on üldiselt aeglasemad võrreldes vedelate või lahustena esinevate ühenditega.
- Reaktsioonid, võivad toimuvad nii geosünteedi peaaheles kui ka kõrvalahelates. Peaaheletes toimuvad reaktsioonid viivad üldjuhul selle katkemiseni, millel on materjali tugevusele suurem mõju kui kõrvalahelate reaktsioonidel, mis ei vii peaahele katkemiseni.

Tabel F.1. Vastupidavus erinevatele keskkonnamõjuritele. [Shukla ja Yin, 2006]

Mõjur	Polümeeri vastupidavus		
	PE	PP	PET
Aluseline keskkond	Kõrge	Kõrge	Madal
Happeline keskkond	Kõrge	Kõrge	Madal
UV-kiirgus	Madal	Rahuldav	Kõrge
Temperatuur	Madal	Rahuldav	Kõrge
Mikroorganismid	Kõrge	Kõrge	Kõrge
Soolad	Kõrge	Kõrge	Kõrge
Detergendid (puhastusvahendid)	Kõrge	Kõrge	Kõrge

Kokkuvõtvalt võib öelda, et PET on üldiselt heade vastupidavuse näitajatega, sest talub hästi nii temperatuuri, UV-kiirgust kui ka sooli ja detergente. Tundlikum on aluseliste ja happeliste keskkondade suhtes. PP on samuti heade vastupidavuse näitajatega, kuid on temperatuurile ja UV-

kiirgusele tundlikum kui PET. PE on väga tundlik temperatuurile ja UV-kiirgusele, muude näitajate osas PP-ga võrdne.

Polümeeride omadused halvenevad degradatsiooni tõttu, mis definitsiooni kohaselt on igasugune muutus või vähenemine polümeeri omadustes keskkonnategurite mõjul. [Carraher Jr., 2017] Polümeeride degradeerumise mehhanisme on mitmeid, mis sõltub konkreetset polümeeri struktuurist ja kokkupuutetingimustest mõjuritega. Degradatsiooni mõjul toimuvad pöördumatud muutused, mille tulemusel toimub purunemine. [Hawkins, 1984]

Geosünteedide puhul võivad peamisteks degradeerumise põhjusteks olla päikesevalgus (UV), temperatuur ja soojuspaisumine, oksüdatsioon, hüdrolüüs, erinevate kemikaalide mõju, mehaanilised pinged ja mikrobioloogilised mõjurid [Kay et al., 2004].

Geosünteedide degradeerumine võib toimuda kolmel erineval režiimil, mis on kujutatud *Joonisel E.1*.

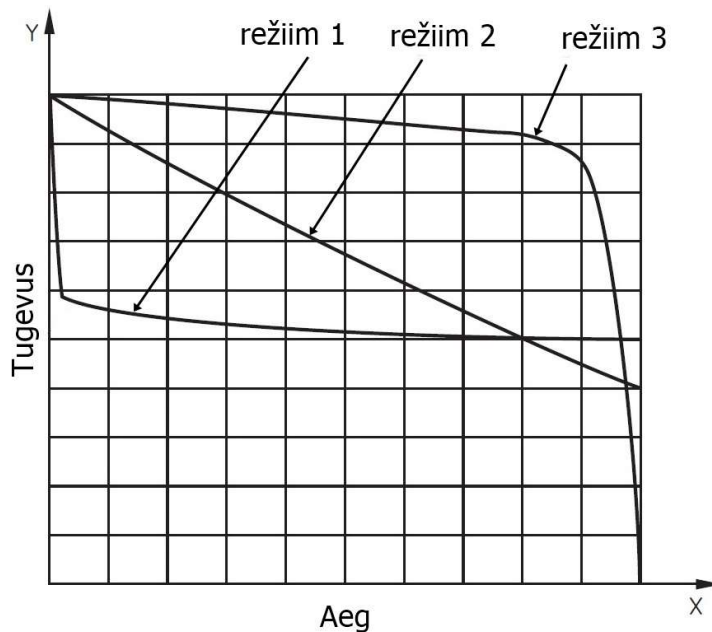
Esimese režiimi puhul toimub kohene tugevuse vähenemine, mis ajaga väheneb veelgi. See on seotud peamiselt paigaldamise käigus tekkinud vigastustega, mis mõjuvad koheselt, põhjustades kiire ja pöördumatu tugevuse vähenemise. Teise režiimi puhul toimub tugevuse järkjärguline vähenemine. See iseloomustab näiteks PET hüdrolüüsi protsessi. Kolmanda režiimi puhul tugevus ei vähene oluliselt pikka aega, kuid mingil hetkel toimub siiski järsk tugevuse vähenemine. Antud režiimi on kõige keerulisem uurida, kuna tugevuse olulist langust on keeruline ennustada. Näiteks võib see seotud olla antioksidantide lõppemisega materjalis, seda on aga raske ette ennustada, sest seda mõjutavad mitmed erinevad keskkonnafaktorid. [Koerner, 2016]

Geosünteedides enim kasutatavad polümeerid on PET ning polüolefiinid ehk peamiselt PP ja PE. PET polümeeril baseeruva geosünteedi peamiseks degradeerumise põhjuseks on hüdrolüüs ning polüolefiinidel baseeruva geosünteedi puhul oksüdatsioon. [Shukla ja Yin, 2006]]

Hüdrolüüs võib toimuda kahel viisil, sisemiselt ning materjali pinna erodeerimisel. Kuna PET polümeer saadakse tereftaalhappe ja etüleenglükooli sünteesil, mille lõpp-produktideks on polüetüleentereftalaat (PET) ja vesi, siis sisemise hüdrolüüsi puhul toimub nõ pöördreaktsioon, mille käigus vesi seob end taas polümeeri karboksüülrühmadega, lõhkudes sidemeid. Selle tulemusel väheneb ka materjali tugevus. Sisemine hüdrolüüs toimub kui pH on ≤ 9 ning selle kiirus sõltub karboksüül lõpurühmade hulgast, kuid on pigem suhteliselt aeglane. Kui pH on ≥ 9 , siis toimub aluselist keskkonnast tingitud hüdrolüüs PET geosünteedi pinnal, sest agressiivsed hüdrosüülionid on materjali sisemusse tungimiseks liiga suured, mille tulemusena geosünteedi materjal erodeerub. Protsessi soodustab ka kaltsiumioonide olemasolu. Erodeerumise tulemusel materjali sisemus säilitab küll oma algse struktuuri, kuigi ristlõige aeglaselt väheneb ja proportsionaalselt väheneb ka tugevus. Hüdrolüüsi mõjutavad nii temperatuur kui ka molaarmass. Mida kõrgem on temperatuur, seda kiirem on ka protsess ning mida suurem on molaarmass, seda väiksem on hüdrolüüsi mõju. [Koerner, 2016]

Oksüdatsioon on polüolefiinide degradatsiooni mehhanism, mida põhjustavad peroksiidid ja muud hapniku ühendid, mis võivad pärineda atmosfäärist, tekkida polümeeri töötlemise käigus või ka katalüsaatori jääkidest. Oksüdatiivne degradatsioon algab vabade radikaalide moodustumisega ning hapniku juuresolekul tekib ahelreaktsioon, mis viib ahelate katkemiseni. See nõrgestab materjali, sest molaarmass ja mehaanilised omadused vähenevad, materjali pinnale tekivad mörad ning värvus muutub. [Koerner, 2016] Oksüdatsiooni protsessi kiirendavad UV-kiirgus, kõrgendatud temperatuur ja siirdemetallide ionid. Geosünteedide oksüdatsioonikindluse

suurendamiseks lisatakse tootmise käigus antioksidante, mille mõjul võib materjalidele kasulik eluiga pikeneda tuhandeid kordi, kuid viimaks antioksidantide mõju siiski lõpeb. [ISO/TR 20432] Antud degradatsiooni mehhanismi kirjeldab režiim 3 (*Joonis F.1*), millel on tegelikult kolm etappi. Esimene etapp on antioksidandi vähenemise faas kuni selle lõppemiseni materjalis, see on ajaliselt kõige pikem ning võib kesta mõnesaja aastani. Teine etapp on oksüdatsiooni induktsiooni faas, kus toimub polümeeri peaahele sidemete katkemine ning ajaliselt tunduvalt lühem kui esimene etapp. Kolmas etapp on materjali kriitiliste kasutusomaduste vähenemise faas, kus materjal muutub hapraks. Antioksidantide eluiga lühendab nende migratsioon, aurustumine või väljauhtumine materjalist. [Bonaparte et al., 2002; Rollin, 2004].



Joonis F.1. Geosünteedika degradeerumise režiimid [ISO/TR 20432].

Allikad:

[ISO/DTR 18228-1] - ISO/DTR 18228-1:2017(E) Design using geosynthetics: Part 1 – General

[Shukla ja Yin, 2006] – Shukla K. S., Yin J-H., (2006). Fundamentals of Geosynthetic Engineering. London, United Kingdom: CRC Press.

[Carragher Jr., 2017] – Carragher Jr., C. E. (2017), Introduction to Polymer Chemistry. Fourth Ed., Boca Raton, Fla.: CRC Press.

[Hawkins, 1984] Hawkins W.L. (1984) Polymer Degradation. In: Polymer Degradation and Stabilization. Polymers Properties and Applications, vol 8. Springer, Berlin, Heidelberg

[Kay et al., 2004] - Kay, D., E. Blond, J. Mlynarek. 2004. Geosynthetics Durability: A Polymer Chemistry Issue. 57th Canadian Geotechnical Conference/5th Joint CGS/IAH Conference, Quebec City, Quebec, Oct. 24-27, 2004. Session 4D. pp. 1-14.

[Koerner, 2016] - Koerner, R.M. Ed. Geotextiles From Design to Applications. Woodhead Publishing, Duxford, 2016.

[Bonaparte et al., 2002] - Bonaparte, R., D.E. Daniel, and R.M. Koerner. 2002. Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems. GeoSyntec Consultants University of Illinois Drexel University. Atlanta, GA 30342 Urbana, IL 61801 Philadelphia, PA 19104

[Rollin, 2004] - Rollin, A. 2004. Long term performance of Polymeric Geomembranes. 57th Canadian Geotechnical Conference/5th Joint CGS/IAH Conference, Quebec City, Quebec, Oct. 24-27, 2004. Session 5D. pp. 20-24.

[ISO/TR 20432] ISO/TR 20432 Guidelines to the determination of long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement

LISA F Geosünteede käsitlevad standardid

Euroopa Standardikomitee Tehnilise Komitee (CEN TC 221) (European Committee for Standardization TC221) poolt välja antud ja kontrollitud geosünteede käsitlevad standardid:

ISO 9862:2005 Geosynthetics — Sampling and preparation of test specimens.

ISO 9863-1:2016 Geosynthetics — Determination of thickness at specified pressures — Part 1: Single layers.

ISO 9863-1:2016/AMD 1:2019 Geosynthetics — Determination of thickness at specified pressures — Part 1: Single layers — Amendment 1.

ISO 9864:2005 Geosynthetics — Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products.

ISO 10318-1:2015 Geosynthetics — Part 1: Terms and definitions.

ISO 10318-1:2015/AMD 1:2018 Geosynthetics — Part 1: Terms and definitions — Amendment 1.

ISO 10318-2:2015 Geosynthetics — Part 2: Symbols and pictograms.

ISO 10318-2:2015/AMD 1:2018 Geosynthetics — Part 2: Symbols and pictograms — Amendment 1.

ISO 10319:2015 Geosynthetics — Wide-width tensile test.

ISO 10320:2019 Geosynthetics — Identification on site.

ISO 10321:2008 Geosynthetics — Tensile test for joints/seams by wide-width strip method.

ISO 10722:2019 Geosynthetics — Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading — Damage caused by granular material (laboratory test method).

ISO 10772:2012 Geotextiles - Test method for the determination of the filtration behaviour of geotextiles under turbulent water flow conditions.

ISO 10776:2012 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of water permeability characteristics normal to the plane, under load.

ISO 11058:2019 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load.

ISO 12236:2006 Geosynthetics — Static puncture test (CBR test).

ISO 12956:2019 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of the characteristic opening size.

ISO 12957-1:2018 Geosynthetics — Determination of friction characteristics — Part 1: Direct shear test.

ISO 12957-2:2005 Geosynthetics — Determination of friction characteristics — Part 2: Inclined plane test

ISO 12958-1:2020 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of water flow capacity in their plane — Part 1: Index test.

ISO 12958-2:2020 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of water flow capacity in their plane — Part 2: Performance test.

ISO 12960:2020 Geotextiles and geotextile-related products — Screening test methods for determining the resistance to acid and alkaline liquids.

ISO 13426-1:2019 Geotextiles and geotextile-related products — Strength of internal structural junctions — Part 1: Geocells.

ISO 13426-2:2005 Geotextiles and geotextile-related products — Strength of internal structural junctions — Part 2: Geocomposites.

ISO 13427:2014 Geosynthetics — Abrasion damage simulation (sliding block test).

ISO 13428:2005 Geosynthetics — Determination of the protection efficiency of a geosynthetic against impact damage.

ISO 13431:1999 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.

ISO 13433:2006 Geosynthetics — Dynamic perforation test (cone drop test).

ISO/TS 13434:2020 Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability.

ISO 13437:2019 Geosynthetics — Installing and retrieving samples in the field for durability assessment.

ISO 13438:2018 Geosynthetics — Screening test method for determining the resistance of geotextiles and geotextile-related products to oxidation.

ISO/TR 18228-1:2020 Design using geosynthetics — Part 1: General.

ISO/TR 18228-2:2021 Design using geosynthetics — Part 2: Separation.

ISO/TR 18228-3:2021 Design using geosynthetics — Part 3: Filtration.

ISO/TR 18228-7:2021 Design using geosynthetics — Part 7: Reinforcement.

ISO/TS 19708:2007 Geosynthetics — Procedure for simulating damage under interlocking-concrete-block pavement by the roller compactor method.

ISO/TR 20432:2007 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.

ISO/TR 20432:2007/COR 1:2008 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement — Technical Corrigendum 1.

ISO 22182:2020 Geotextiles and geotextile-related products — Determination of index abrasion resistance characteristics under wet conditions for hydraulic applications

ISO 25619-1:2021 Geosynthetics — Determination of compression behaviour — Part 1: Compressive creep properties

ISO 25619-2:2015 Geosynthetics — Determination of compression behaviour — Part 2: Determination of short-term compression behaviour.