



TRANSPORDIAMET



Geosüntetika kvaliteedikontrolli arendamine etapp 2

Uuringu lõpparuanne



Töövõtuleping nr 1-12/19/1733-1

Tallinn 2023

Tellija: Maanteeamet / Transpordiamet

Teelise 4 Tallinn

tel. 611 9300

Kontaktisik: Karl-Kristjan Suits teemullete ekspert

(e-mail: karl-kristjan.suits@transpordiamet.ee)

Töö täitja: Tallinna Tehnikaülikool

Aadress: Ehitajate tee 5 Tallinn

Telefon: 6 202 907

Koostaja: Andres Krumme Kaasprofessor tennuris, labori juhataja - Biopolümeeride tehnoloogia labor: Materjali- ja keskkonnatehnoloogia instituut

(e-mail: andres.krumme@taltech.ee)

©Transpordiamet, 2023

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 teostajal. Tööd võib vabalt tervikuna tasuta kasutamiseks välja anda või tsiteerida allikale viidates.

Sisukord

1.	Arendustöö tähtsamad järeldused ja soovitused geosünteedide kasutamiseks	5
2.	Arendustöö eesmärk	5
3.	Arendustöö teoreetiline osa	7
3.1	Erinevate riikide juhendmaterjalide läbitöötamine ning nendest ülevaate tegemine	7
3.1.1	Geosünteedide üldised omadused lähtuvalt nende polümeersest olemusest.....	7
3.1.2.	Polümeeride degradatsioon	9
3.1.3	Geosünteedide keemiline vastupidavus	10
3.1.4	Polümeeride mehaanilised omadused	12
3.1.5	Polümeeride omaduste kokkuvõte	16
3.2	Geosünteedi pikaajalise vastupidavuse hindamine	16
3.2.1	Roomedeformatsioon ja roomepurunemise vähendusfaktor RF_{CR}	18
3.2.2	Keemilise ja bioloogilise mõju vähendusfaktor RF_{CH}	22
3.2.3	UV-kiirguse mõju vähendusfaktor RF_W	24
3.2.4	Mehaaniliste kahjustuste vähendusfaktor RF_{ID}	25
3.2.5	Täiendavad vähendusfaktorid ja ohutusfaktor	25
3.3	Geosünteedide käitumine madalatel temperatuuridel	26
3.3.1	Geosünteedid erinevatel temperatuuridel.....	26
3.2.2	Geosünteedide mehaaniliste omaduste temperatuurisõltuvus.....	27
3.2.4	Geosünteedide roomekäitumine madalatel temperatuuridel.....	28
3.3	Juhised geosünteedidega projekteerimiseks ja kasutusvaldkonna valikuks.....	30
4.	Osalemine eksperdina geotehnika projektis	32
5.	Objektidel geosünteedide proovide võtmine ja tööde teostamiseks võrdluskatsete tegemine	32
6.	Geosünteedika objektilt võetud proovide katsetamine erinevates kliimaoludes ning sellest tulenevate Eestis tehtavate katsete soovitude esitamine.....	34
7.	Roomekatsete teostamine ja meetodikate väljatöötamine.....	36
7.1	Katsete ettevalmistamine ja teostamine	36
7.2	Roomekäitumise katsetamine ja roomekatsed kombineeritud keemilise vanandamisega	38
7.3	Metoodika väljatöötamine geosünteedide pikaajalise vastupidavuse kiirendatud hindamiseks Eestis	40
8.	Järeldused	41
8.1	Tööde tulemusel koostatud järeldused	41
8.2	Arendusettepanekud	43
9.	Summary	45
10.	Kasutatud kirjandus.....	47
11.	Artikkel Teelehte	51

LISA 1 Geosünteedide kiirendatud keemilise vanandamise protseduur.....	53
LISA 2 Protseduur temperatuuri mõju hindamiseks geovõrkude tõmbeomadustele	62
LISA 3 Geovõrkude kiirendatud roomekäitumise hindamise protseduur.....	68
LISA 4 Protseduur geosünteedide roomekäitumise hindamiseks kombineerituna keemilise vanandamisega	78
LISA 5 Roomekatse tulemuste detailne analüüs.....	85

1. Arendustöö tähtsamad järeldused ja soovitused geosünteedide kasutamiseks

Polüestrid ja aramiid on tundlikud leeliselise keskkonna suhtes - neil põhinevaid geosünteepte ei või neid kasutada kokkupuutes põlevkivituhaga, tsemendi või lubjakiviga kui keskkonna pH on üle 12. Töö raames tehtud katsete tulemused kinnitavad, et PET põhised geosünteedid ei sobi kindlasti kasutamiseks põlevkivituhaga, eriti värske põlevkivituhaga leostusveega kokkupuutel. Kui kasutuskeskkonna pH on vahemikus 9-11, siis erandkorras võib ette näha polüestritel põhinevate geosünteedide kasutamist peale tootespetsiifiliste uuringute läbiviimist.

Kõiki turul olevaid eeltoodust erinevaid geosünteeditika materjalide liike ja uusi materjale mida kavatakse kasutada konstruktsiooni tugevdamisel, tuleb hinnata Eestile iseloomulike keemiliste riskide seisukohalt. Vastavad meetodikad on välja töötatud.

Proovide võtmisel ja katsekehade ettevalmistamisel on vaja nii proovivõtjate kui ka katsetajate pädevuse sertifitseerimine analoogselt geotehniliste uuringute ja katsetamise kvaliteedi ja hindamisele vastavalt standardiseeriale ISO/TS 24283.

Tee konstruktsiooni projekteerimisel tuleb geosünteedidega konstruktsiooni arvutamisel arvestada minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul kõrgeima kasutustemperatuuriga ja maksimaalse purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga. Kui ehitaja soovib kasutada erineva koostisega polümeeri kui see, millel põhinevad projekti arvutused, siis tuleb arvutused uuesti teostada soovitava polümeeriga.

Projekteerimisel tuleb tagada, et geosünteedi eeldatav roome ei ületaks materjali kasuliku eluea jooksul ette nähtud maksimaalse deformatsiooni ulatust või ei viiks materjali purunemiseni.

Geosünteedidega konstruktsiooni projekteerimisel tuleb minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul arvestada kõrgeima kasutustemperatuuriga ja purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga.

Eestis tuleb välja arendada tehnoloogiline valmisolek, et töös käsitletud meetodeid rakendada akrediteeritud katselabori tasemel. Sõltumata sellest kes labori loob, on Taltech'i biopolümeeride tehnoloogia laboris töös nii katseseadmed kui tehniline valmisolek katsetuste teostuseks.

2. Arendustöö eesmärk

Transpordiehitiste konstruktsioonis olevad materjalid ja pinnased, mida on geosünteedidega tugevdatud on allutatud nii püsivale, korduvale või tsüklilisele koormusele. Eeltoodud koormustingimused esinevad katendites, alustes, tugevdatud aluspinnastes ja teega ümbritsevas konstruktsioonis jms. Kui meil ei ole piisavaid teadmisi geosünteedide kui polümeersete materjalide lühi-, keskmise ja pikaajalise toimimise ning pinnase vahelise vastastikuse mõju kohta siis on see takistuseks nende kasutamisel püsivates konstruktsioonides.

Projekteerida vastavaid konstruktsioone on keeruline, kui Tellija näeb ette empiiriliste katsete alusel tüüplahenduste kasutamise milles ei ole olnud kasutusel geosünteedid. Sellisel juhul

tüüplahenduste kasutamine projekteerimisel võib tekitada probleeme kuna tüüplahendustes ei ole arvestatud geosünteedide lähtematerjalide ja lisandite mõju erinevates keskkondades. Maailmas on levinud nii poolempiirilised kui tootjapoolsed empiirilised meetodid liikluskoormuse all olevate teede projekteerimisel geosünteedide kasutamiseks. Väga oluline on teada, missuguses konstruktsiooni (kihi) projekteerimisel vastavalt eesmärgile missugusest lähtematerjalist (polümeerist) geosünteedi missugusel kujul kasutada ja missugused täiendavaid nõuded tuleb arvestada nii keskkonnast kui ümbritsevate kihtide omadustest.

Töövõtja eesmärgiks oli seatud pärast täiendavat teoreetilist analüüsi (st sarnase kliima ja geotehniliste tingimustega riikide geosünteedika standardite, teaduslike uurimistööde ja juhendmaterjalide läbitöötamist) ja vajadusel täiendavate katseseadmete konstrueerimist ning vajalike katsete teostamist eeltoodu alusel välja töötada meetodikad geosünteedide pikaajalise vastupidavuse kiirendatud hindamiseks lähtuvalt Eestis esinevates spetsiifilistest kliimaatilistest või keskkonna keemilistest oludest.

Arendustöö oli toetav osa Tellijal poolt tellitud arendustööle „Muldkoha projekteerimine (sh arvutused) ja tüüplahenduste väljatöötamine“, kus oli ette nähtud antud töö tulemuste rakendamine oludes kus geosünteedika on üks alternatiivseid tee konstruktsiooni tugevdavaid ja veerežiimi korrigeerivaid meetmeid. Tööde raames toimus kahe arendustöö vaheline pidev koostöö, kus mõlemad pooled andsid oma sisendi teise poole arendustöösse.

Arendustöö toetus eelnevale uuringule (nn. etapp 1), mille raames olid teostatud katsetused tol hetkel teedehituses enim kasutuses olevate geosünteedikast võetud katsekehadest. Tööde raames hinnati siis geosünteedika katsete tegemise võimalikkust Eestis, missuguseid katseseadmeid peaks muretsema, erinevate polümeeride koostise ja madalate temperatuuride mõju geosünteedikale ning koostati hinnang geosünteedika kui polümeeride klaasistumisele erinevate temperatuuride mõjul.

1 etapi olulisemad ettepanekud millest lähtuti 2 etapis olid:

- katsetuse korraldamisel tuleb eristada materjalile iseloomulikke (tegelikke) omadusi indeksomadustest, mis on vajalikud materjali toimimiseks ettenähtud tingimustes ja kasutusea jooksul. Oluline on tagada, et iseloomulike omaduste väärtused ületaksid antud kasutuskeskkonnas nõutud omaduste väärtuse kogu kavandatud kasutusea jooksul
- kui geosünteedi nõutav eluiga ei ületa 25 aastat või kui konstruktsioon on projekteeritud lähtudes kasutuspiiriseisundist, siis piisab suuremate maaletoojate ja partiide regulaarsest kontrollist läbi indekskatsete ning uute materjalide ja maaletoojate kontrollimisest.
- põhjalikum kontroll on vajalik paigaldistes, kus tee projekteerimise toimub tee kandepiiriseisundist lähtudes st kui millele rakenduvad erinõuded vastupidavuse ja pikaajalisuse osas ning milles geosünteedid on kontaktis keemiliselt aktiivsemate keskkondadega, nagu lubi, tsement ja tööstusjäätmed ja aruandes loetletud juhtudel.
- välja töötada ja rakendada meetodika geosünteedide pikaajalise vastupidavuse kiirendatud hindamiseks Eestis esinevates spetsiifilistes kliimaatilistes või keskkonna keemilistest oludest lähtuvates tingimustes.

3. Arendustöö teoreetiline osa

3.1 Erinevate riikide juhendmaterjalide läbitöötamine ning nendest ülevaate tegemine

Arendustöö alguses teostati esmalt vajalik teoreetiline analüüs. Tellijaga kooskõlastatult töötati läbi töö ülesandega seotud erinevate riikide juhendmaterjalid, teaduslik kirjandus ja teadusartiklid ning standardid. Ülevaade on tervikuna ära toodud Transpordiametile kevadel 2020 üle antud dokumendis „Geosünteeтика kvaliteedikontrolli arendamise 2.etapp – Standardite ja kirjanduse ülevaade“. Eeltoodu põhjal teostati metanalüüs selgitamaks teedehituse vajadustest ja Eesti oludest lähtuvalt välja geosünteedide ajalise vastupidavuse katsetamise vajaduse esmane ulatus ning selleks sobiv katseaparatuur. Analüüsi ka erinevate temperatuuritsüklite võimalikku mõju pikaajalisel vanandamisel, millega arvestati katsetoodika ettevalmistuses.

Algselt teostatud teoreetilise töö tulemusena selgus vajadus täiendavalt hinnata geosünteedide keemilist vastupidavust teekonstruktsioonides potentsiaalselt enamlevinud probleemsetes keskkondades, mille baasil saaks edaspidi keemilistes mudelkeskkondades teostada katseid ilma (üldjuhul) objektil vastavaid tootomaduste katseid teostamata. Tellija poolt telliti need katsed eraldi Lepinguga ning nende tulemusi arvestati arendustöö edasistes faasides.

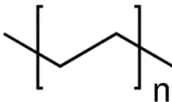
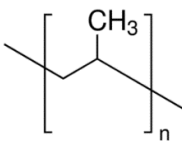
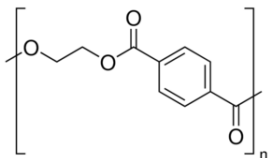
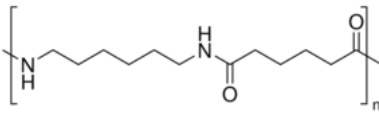
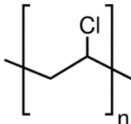
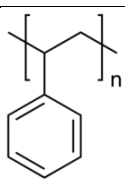
Järgnevalt on toodud antud uurimistöö jaoks olulisem info teoreetilisest ettevalmistusest, mida arendustöö raames on täiendatud kui saadi uut teavet ka katsetustest või täiendavast teabest erinevatest teaduslikest materjalidest.

3.1.1 Geosünteedide üldised omadused lähtuvalt nende polümeersest olemusest

Geosünteedide peamiseks lähtematerjaliks on polümeerid. Sõna polümeer on tuletatud kreeka keelsest sõnadest poly – palju ja meros – osa. Polümeerid koosnevad makromolekulidest, mis omakorda koosnevad paljudest korduvatest ühikutest ehk meridest, mis on omavahel seotud kovalentsete keemiliste sidemetega ning paiknevad polümeeris teatava korrapärasuse alusel. Polümeerid on oma struktuuri poolest poolkristallilised või amorfseid. Viimaste juhul on polümeerahelad materjalis paigutunud juhuslikult ja korrapäraselt. Poolkristalliliste polümeeride puhul on ahelad osades piirkondades samuti paigutunud korrapäraselt ning mingites piirkondades paigutunud korrapärasesse kristallvõrre, 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.

Polümeerid jaotatakse veel ka termoplastideks ja termoreaktiivideks. Termoplastide ahelad on lineaarsed ja vähehargnenud, temperatuuri mõjul on võimalik neid korduvalt pehmenendada ja taas tahkestada. Termoreaktiivid ehk rektoplastid on seevastu võrestikstruktuuriga ning kuumutamisel seotakse ahelad pöördumatult. Geosünteedid on enamasti termoplastid. Kõige enam kasutatavad polümeerid ning vastavad geosünteedi tüübid on ära toodud tabelis 1.

Tabel 1. Geosünteesides peamiselt kasutatavad polümeerid ja vastav geosünteesi tüüp. [Koerner, 2012]

Polümeer	Korduv ühik	Geosünteesi 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

Uurides geosünteeside vastupidavust annab esmase indikatsiooni lähtematerjalide st polümeeride keemiline koostis. Polümeeri konkreetsete omaduste, näiteks mehaaniliste, optiliste, elektriliste või tööaja parandamiseks kasutatakse spetsiifilisi lisandeid. Geosünteeside puhul on eriti oluline tööea pikkus ning selle pikendamiseks lisatakse antioksidante, UV stabilisaatoreid, pigmente, metallioonide deaktiveerijaid jne. Tabelis 2 on ära toodud geosünteesides enim kasutatavad polümeeride ja lisandite ligikaudsed kaaluprotsendid.

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

Polümeer	Polümeeri sisaldus, %	Erinevate lisandite sisaldus, %	Tahma/värvi-pigmentide sisaldus, %	Täite-ainete sisaldus, %	Plastifi-kaatori 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

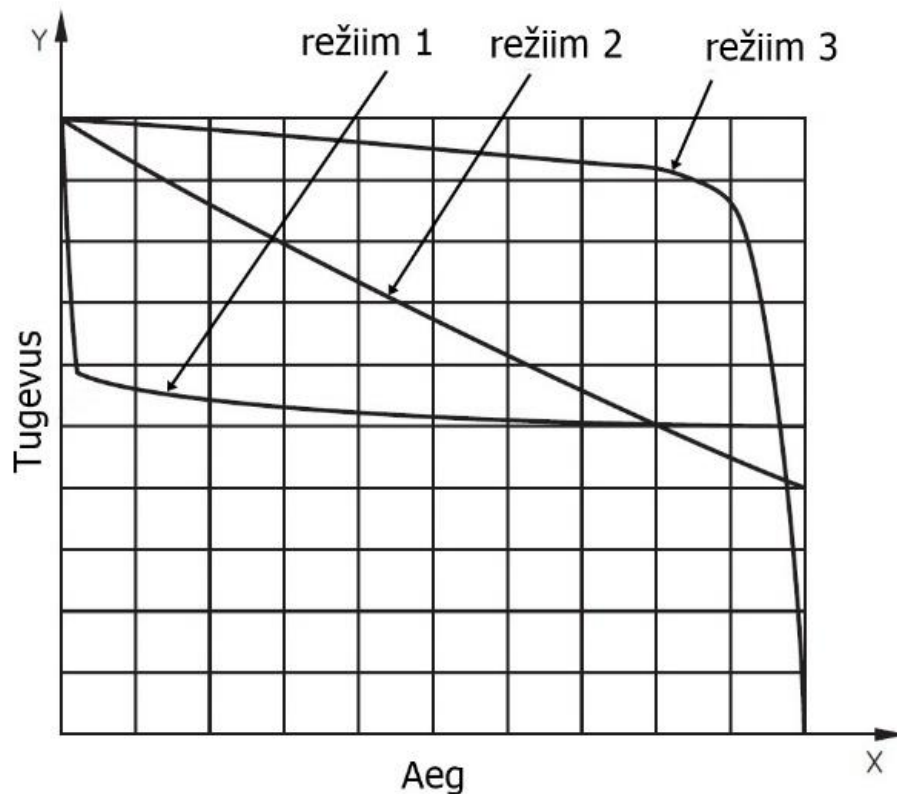
3.1.2. Polümeeride degradatsioon

Polümeeride degradatsioon on nende omaduste muutus keskkonnategurite mõjul. Polümeeride degradeerumise mehhanisme on mitmeid, need sõltuvad polümeeri struktuurist ja kokkupuutetingimustest mõjuritega. Degradatsiooni mõjul võivad toimuda pöördumatud muutused, mille tulemusel toimub purunemine.

Geosünteedide puhul võivad peamisteks degradeerumise põhjusteks olla päikesevalgus (UV), temperatuur ja soojuspaisumine, oksüdatsioon, hüdrolüüs, erinevate kemikaalide mõju, mehaanilised pinged ja mikrobioloogilised mõjurid jms. Geosünteedide degradeerumine võib toimuda kolmel erineval režiimil, mis on kujutatud joonisel 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.



Joonis 1. Geosünteeatika degradeerumise režiimid [ISO/TR 20432].

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 keskkonnamõjurid. Antud režiimis degradeerumise tulemus, kui see toimub ootamatult, võib oluliselt mõjutada konstruktsiooni püsivust, kui seda ei ole arvesse võetud projekteerimisel.

3.1.3 Geosünteedide keemiline vastupidavus

Geosünteedide keemiline vastupidavus sõltub suuresti geosünteedi polümeersest olemusest, millest omakorda sõltub ka vastupidavus erinevatele keskkonnamõjuritele. Tabelis 4 on ära toodud kolme põhilisema geosünteedides kasutatava polümeeri vastupidavus erinevatele keskkonnamõjuritele.

Tabel 3. Vastupidavus erinevatele keskkonnamõjuritele. [Shukla ja Yin, 2006]

Mõjur	Polümeeri vastupidavus		
	PE/HDPE	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

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 geovõrkude oma.
- Reaktsioonid tahkete keemiliste ühenditega on üldiselt aeglasemad võrreldes vedelate või lahustena esinevate ühenditega.

Geosünteedide keemilise degradatsiooni algpõhjused on kirjeldatud ISO/TS 13434:2008 Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability.

Polüetüleenterftalaadi degradeerumise peamiseks põhjuseks on hüdroolüüs, millele lisandub pinna erosioon, kui keskkonna pH > 9. Hüdroolüüs 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 hüdroolüüsi puhul toimub nõ pöördreaktsioon, mille käigus vesi seob end taas polümeeri karboksüülrühmadega, lõhkudes sidemeid. Selle tulemusel väheneb ka materjali tugevus. Sisemine hüdroolüüs 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 hüdroolüüs PET geosünteedi pinnal, sest agressiivsed hüdroksüülioonid 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. Hüdroolüüsi mõjutavad nii temperatuur kui ka molaarmass. Mida kõrgem on

temperatuur, seda kiirem on ka protsess ning mida suurem on molaarmass, seda väiksem on hüdroolüüsi mõju. [Koerner, 2016]

Polüolefiinide peamiseks degradatsioonipõhjuseks on oksüdatsioon, millega kaasneb ahelate katkemine, molaarmassi ja sellest lähtuvalt ka tugevuse vähenemine. Oksüdatsiooni võib käivitada UV kiirgus ja kõrgendatud temperatuur, aga ka raskemetallide, sh. raua ionide esinemine. Polüolefiinide eluiga võib antioksidantide lisamisel pikeneda sadu või tuhandeid kordi. Mehaanilised omadused ei halvene enne antioksidandi lõppemist materjalis, mis peaks toimuma režiimis 3, kavandatud eluea lõpus. Antioksidandi enneaegne lõppemine võib toimuda selle aurustumise, migratsiooni või väljauhtumise tõttu.

Polüamiidid võivad degradeeruda nii hüdroolüüsi kui ka oksüdatsiooni tõttu. Hüdroolüüsi põhjustab kontakt veega kõrgematel temperatuuridel, oksüdatsiooni tingib UV, temperatuur, happeline või aluseline keskkond. Aromaatsed polüamiidid on vastupidavamad kuid siiski tundlikud UV kiirguse suhtes.

Reaktsioonid võivad toimuvad nii geosünteedi peaahtelas kui ka kõrvalahelates. Peaahtelates toimuvad reaktsioonid viivad üldjuhul selle katkemiseni, millel on materjali tugevusele suurem mõju kui kõrvalahelate reaktsioonidel, mis ei vii peaahtela katkemiseni. Eestis paigaldatavates geosünteedides enim kasutatavad polümeerid on PET ning polüolefiinid ehk peamiselt PP ja PE. PET polümeeril baseeruva geosünteedi peamiseks degradeerumise põhjuseks on hüdroolüüs ning polüolefiinidel baseeruva geosünteedi puhul oksüdatsioon.

3.1.4 Polümeeride mehaanilised omadused

Polümeeride mehaanilisi omadused on:

- Elastsus - materjali võime taastada omaesialgne kuju peale koormuse eemaldamist.
- Plastsus (nimetatakse ka venitatavuseks) - materjali võime purunemata muuta talle rakendatud väliskoormuse mõjul oma kuju ja mõõtmeid ning säilitada pärast välismõju lakkamist plastset jääkdeformatsiooni.
- Tugevus - materjali võime purunemata taluda koormust.
- Sitkus - materjali omadus taluda enne purunemist deformatsiooni.
- Rabedus – materjali purunemine mehaaniliste mõjude toimel, ilma et tekiks märgatavaid plastseid deformatsioone.
- Kõvadus - materjali võime vastu panna kohalikule plastsele deformatsioonile.

Mehaanilise käitumise aluseks on rakendatud pinge mõjul polümeerides toimuv deformatsioon, mis võib olla nii taastuv kui ka mittetaastuv. Eristatakse viite põhilisemat deformatsiooni põhjustavat jõu ülekandmise viisi: tõmme, nihe, surve, paine ja vääne. Polümeeride mehaaniliste omaduste hindamisel on tõmbekatse kõige enam kasutatavam meetod, mille käigus mõõdetakse materjali vastupanu staatilisele rakendatud pingele konstantsel tõmbekiirusel (deformatsioonil). Joonisel 2 on näha tüüpilist pinge-deformatsiooni kõverat. Polümeeri vastupanu tõmbele ehk pinge ja deformatsiooni vahelist suhet elastse deformatsiooni piirkonnas kirjeldab Young'i moodul, mida nimetatakse ka elastsusmooduliks.

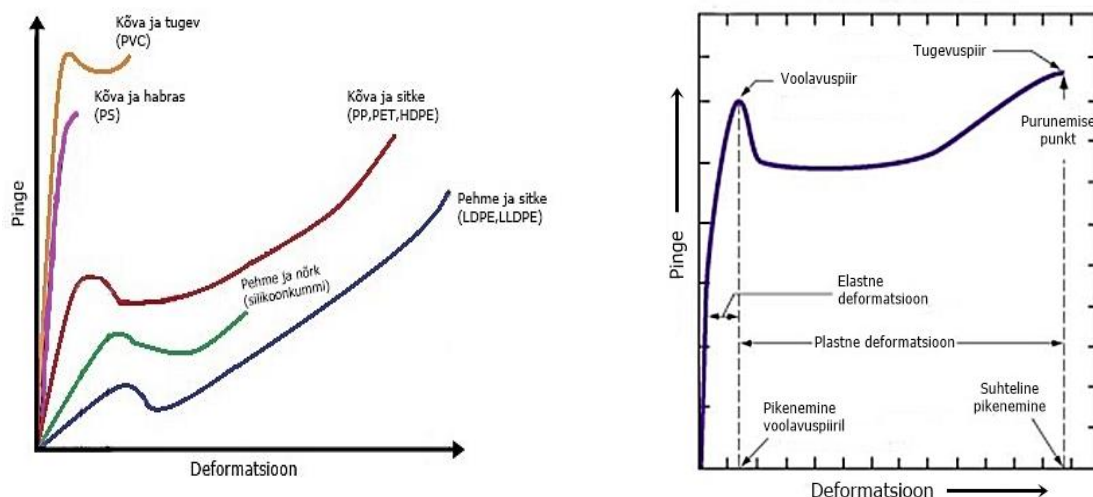
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (MPa) \quad (1)$$

kus E – elastusmoodul (Young'i moodul)

σ – tõmbepinge

ε - tõmbedeformatsioon ehk pikenemine

Mida suurem on Young'i mooduli väärtus, seda jäigem ja vastupidavam on materjal pikenemisele ning venitamisele.



Joonis 1. (A) Tüüpiliste polümeeride pingede-deformatsiooni kõverad; (B) Tüüpilise termoplastse polümeeri pingede-deformatsiooni kõver sellelt saadavate näitajatega. [Askeland, 1996]

Joonisel 2 (A) on näha tüüpilisi polümeeride pingede-deformatsiooni kõveraid, kus iga joon kirjeldab teatud omadustega polümeeri, ära on toodud ka mõningad näited konkreetsetele polümeeridele.

Joonisel 2 (B) on näha kõva ja sitke ehk tüüpilise poolkristallilise polümeeri ja ühtlasi tüüpilise geosünteedi polümeeri näitel pingede-deformatsiooni kõvera selgitavat joonis, mille täpsemad selgitused on ära toodud tabelis 4.

Tabel 4. Pinge-deformatsiooni kõveralt saadav info

Määratlus	Kirjeldus
Voolavuspiir	Esimene punkt, kus katsekeha voolab ja ristlõikepindala hakkab vähenema, seda nimetatakse kaela moodustumiseks. Selles punktis tekib püsiv deformatsioon. Materjal käitub selle piiri ületamisel plastiliselt ning edasisel koormamisel ei taastu enam materjali algsed mõõtmed.
Elastusmoodul (Young'i moodul)	Pinge ja deformatsiooni suhe pingede-deformatsiooni kõvera elastses piirkonnas
Pikenemine voolavuspiiril	Deformatsioon voolavuspiiril
Elastne deformatsioon	Kõvera osa enne voolavuspiiri. Koormuse eemaldamisel taastuvad koheselt katsekeha algsed mõõtmed

Plastne deformatsioon	Kõvera osa peale voolavuspiiri. Koormuse eemaldamisel katsekeha algsed mõõtmed enam ei taastu
Tugevuspiir	Maksimaalne pinge, mida materjal suudab taluda enne purunemist
Suhteline pikenemine e. deformatsioon purunemisel	Katsekeha pikenemise ja algpikkuse suhe purunemisel

Oluline on aga eraldi välja tuua, et materjali sitkus on määratletud kui ala, mis jääb pinge-deformatsiooni kõverast allapoole. Sitkus on materjali võime absorbeerida energiat enne purunemist. Tugevuse ja sitkuse peamine erinevus ongi see, et tugevus näitab kui palju jõudu peab rakendama, et katsekeha puruneks ning sitkus näitab kui palju energiat kulub, et katsekeha puruneks. Seega kui materjali kõvera alune ala ei ole eriti suur, siis materjal deformeerub enne purunemist vähe, mis tähendab, et materjal ei ole sitke. Jooniselt 2 (A) on näha, et kollase ja pruuni joonega tähistatud materjalid (PVC ja PS) on tugevad, sest nende purunemiseks tuleb rakendada palju jõudu, aga nende kõveraalune osa on väga väike ja seega deformatsioon on minimaalne, seetõttu pole need materjalid ka sitked.

Nagu jooniselt 2 (B) oli näha, siis pinge-deformatsiooni kõveral on kaks peamist deformatsioonipiirkonda – elastne ja plastne. Elastse deformatsiooni puhul taastuvad materjali mõõtmed koheselt. Plastne ehk viskoosne deformatsioon on ajast sõltuv ning materjali algsed mõõtmed ei taastu pärast koormuse eemaldamist. Selline käitumine on seotud materjali voolavusega.

Polümeeridele on iseloomulik ka vahepealne käitumine ehk kombinatsioon elastsest ja viskoossest deformatsioonist. Seda nimetatakse viskoelastsuseks, mis sõltub pinge kestvusest, koormamise kiirusest, temperatuurist. Viskoelastne käitumine väljendub peamiselt kahel viisil, pingerelaksatsiooni ja roomena. Pingerelaksatsioon on pinge vähenemine ajas konstantse deformatsiooni juures. Roome, mida nimetatakse ka külmvoolamiseks, on deformatsiooni kasv ajas konstantse pinge rakendamisel. Geosünteedide pikaajalise vastupidavusele avaldab mõju roome. Roomekatse on üheks käesoleva arendustöö katsemeetoditeks.

Roomekäitumise võib jagada kolme faasi:

- 1) primaarses ehk esmases faasis toimub roomedeformatsiooni kasv koos deformatsiooni kiiruse vähenemisega;
- 2) sekundaarses ehk stabiilses faasis toimub ajas lineaarselt kasvav deformatsioon, mille kiirus on konstantne;
- 3) tertsiaalses faasis kasvab nii deformatsioon kui ka deformatsiooni kiirus suhteliselt kiiresti, kuni materjali purunemiseni.

Roomekäitumine on seotud materjalis esinevate aatomite ja molekulide liikuvuse ning vaba ruumiga. Pinge all hakkavad poolkristallilise polümeeri amorfse faasi makromolekulid lahti hargnema, mille tulemusel molekulid ka libisevad üksteise suhtes ja võivad lõpuks puruneda. [Sang-Sik, 2007] Roomet mõjutab ka temperatuur, mis avaldab mõju materjali üleminekutele ühest olekust teise (joonis 3).

Allpool klaasisiirdetemperatuuri T_g , ehk klaasiolekus on materjali tihedus suurem, makromolekulide liikumist võimaldav vaba maht väiksem. Materjal võib seega deformeeruda ainult läbi peaahela aatomite vaheliste kovalentsete sidemete nurkade või pikkuse muutumise.

[Dowling, 2007] Aatomite ning makromolekulide väikse liikuvuse tõttu käitub materjal hapralt, klaasitaoliselt ja võib enne purunemist deformeeruda ainult elastselt ehk taastuvalt.

Kummiolekus on materjali tihedus väiksem, vaba maht ja aatomite ning ahelate liikuvus suurem ning nõrkade sidemete mõju väiksem, võimaldades materjalile enne purunemist laiaulatuslikku plastset (viskoosset) ehk pöördumatut deformatsiooni. Liikuvust kummiolekus piiravad siiski makromolekulide vahelised ristsidemed, pikad kõrvalrühmad või peaahela rühmad, mis muudavad ahelad jäigemaks, ehk takistavad nende libisemist.

Roome kiirus kasvab nii temperatuuri kui koormuse ehk pinge suurenemisel. Koormuse ja temperatuuri kasvuga kaasnevad järgmised nähtused [Dowling, 2007]:

- kasvab deformatsioon pinge rakendamise hetkel;
- kasvab roomedeformatsiooni kiirus sekundaarses ehk stabiilses faasis;
- materjali purunemiseks kuluv aeg lüheneb.

Roome toimub termilise aktivatsiooni tulemusena [Sinclair ja Edgemon, 1969] ning selle kiirust stabiilses ehk sekundaarses režiimis saab kirjeldada Arrheniuse tüüpi võrrandiga:

$$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

kus $\dot{\epsilon}_s$ on roome deformatsiooni kiirus stabiilses faasis,

σ on rakendatud pinge,

n on pinge eksponent

Q on aktivatsioonienergia,

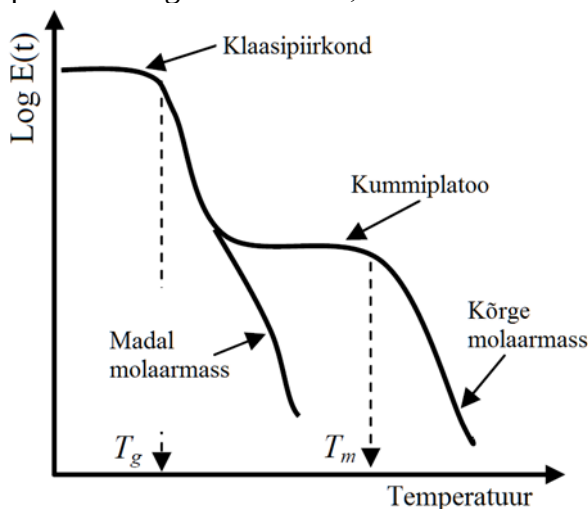
R on universaalne gaasikonstant,

T on absoluutne temperatuur.

Valemist 2 lähtub, et roome kiirus kasvab nii temperatuuri kui pinge suurenemisel. Roome deformatsioon on omakorda märgatavalt suurem, kui protsess kulgeb temperatuuril, mis ületab materjali klaasisiirdetemperatuuri T_g . Aktivatsioonienergia Q on defineeritud kui energia barjäär, mis tuleb molekulide liikuvuse saavutamiseks ületada [Goertzen ja Kessler, 2006]. See energia on seotud aatomite vaheliste nõrkade või tugevate sidemete energiaga. Nõrkade sidemete energia on tunduvalt (~10 korda) väiksem kui tugevate sidemete energia, seega on makromolekulide omavahelise liikumise aktivatsioonienergia seotud pigem nõrkade sidemetega. Tugevate, kovalentsete sidemete energia ületamine tähendab juba makromolekulide purunemist. Aktivatsioonienergia suurenemisel roomedeformatsiooni kiirus väheneb, kuna molekule hoitakse tugevamini koos ja nende liigutamiseks on vaja enam energiat. [Lim et al., 2003]

Kuna temperatuuril on suur mõju polümeeride, seega ka geosünteedide mehaanilistele omadustele ning seda eriti klaasisiirdepiirkonnas, siis sellest tulenevalt võib öelda PET polümeeril põhinevad geosünteedid on suhteliselt roomekindlad, sest PET klassisiirdetemperatuur on 75°C juures. [Crawford, 1999] See tähendab, et PET geosünteed on Eestis oludes kasutamistemperatuuridel klaasiolekus ja roomet ehk pöördumatut deformatsiooni konstantse pinge tingimustes enne purunemist ei toimu. Polüolefiinidel, eelkõige PE ja PP põhinevate geosünteedide puhul on olukord aga vastupidine, sest PP ja PE

klaasisiirdetemperatuurid on vastavalt -10°C ja -120°C juures. [Crawford, 1999] See tähendab et geosünteeet on Eesti oludes suurema osa aastast kummiolekus, mis võimaldab suurt purunemisdeformatsiooni aga ka roomet. PP-st geosünteeet võib siiski talvisel perioodil, kui temperatuur langeb alla -10°C , olla ka klaasiolekus, mis PE puhul on välistatud.



Joonis 3. Polümeeri elastsusmooduli sõltuvus temperatuurist [Painter ja Coleman, 1997].

3.1.5 Polümeeride omaduste kokkuvõte

- Geosünteeetides enim kasutatavad polümeerid on PET ning polüolefiinid PP ja PE(HDPE).
- Geosünteeetide degradatsiooni peamiseks põhjusteks on PET hüdrolyüs (degradatsiooni 2. režiim) ja polüolefiinide puhul oksüdatsioon (degradatsiooni 3. režiim).
- PET on üldiselt heade vastupidavuse näitajatega, sest talub hästi nii temperatuuri, UV-kiirgust kui ka sooli ja detergente. Tundlikum on aluselistele ja happelistele keskkondade suhtes. PP on hea keemilise vastupidavusega, kuid on temperatuurile ja UV-kiirgusele tundlikum kui PET. PE on väga tundlik temperatuurile ja UV-kiirgusele, muude näitajate osas PP-ga võrdne.
- PET, PP ja PE on termoplastsed polümeerid mille pingede-deformatsiooni kõvera põhjal võib öelda, et nad on kõvad ja sitked materjalid.
- Kuigi PP, PE ja PET on enamlevinud geosünteeetide materjalid ja seetõttu ka antud uuringu põhifookuses, saab uuringu järeldusi laiendada ka teistele geosünteeetide materjalidele, nagu PVC, PA ja PS millel esineb samuti füüsikaliste omaduste temperatuurisõltuvus.

3.2 Geosünteeedi pikaajalise vastupidavuse hindamine

Tugevdatud pinnasekonstruktsioonides tuleb arvestada armeeringu maksimaalse deformatsiooni ja minimaalse koormusega mis viib purunemiseni kavandatud kasutusea (design lifetime) jooksul. Neid nimetatakse vastavalt kasutuspiiriseisundiks (serviceability limit

state, SLS) ja kandepiiriseisundiks (ultimate limit state, ULS). Mõlemad omadused sõltuvad ajast ja võivad keskkonna mõjul halveneda.

Tsiviilehituse konstruktsioonide kavandatud kasutusiga, tüüpiliselt 50 – 100 aastat on liiga pikk aeg vahetute mõõtmiste läbiviimiseks. Seetõttu kasutatakse projekteerimisel arvutustes vähendusfaktoreid, mis leitakse lühiajaliste katsetuste tulemuste ekstrapoleerimise kaudu.

Roome- või degradatsiooniprotsessi kiirendamiseks võib vajaduse korral katsed läbi viia kõrgendatud temperatuuril.

Deformatsiooni ja tugevuse muutumise põhjused võivad olla mehaaniline kahjustus paigaldusel, püsiv staatiline või dünaamiline koormus, kõrgendatud temperatuur, vananemine UV kiirguse toimel, loodusliku või saastunud pinnase keemilised mõjud.

Tugevdamise kavandamisel tuleb arvestada nn. kasutustemperatuuri. Esmalt peaks see olema defineeritud lähtuvalt rakendusest. Kui puudub selline info või paigalduskoha spetsiifiline pinnase temperatuuri info, siis võib kasutada temperatuuri, mis on aasta keskmise õhutemperatuuri ja paigalduskoha kõige soojema kuu keskmise päevase temperatuuri keskmine. Kui ka sellist infot pole saadaval tuleb vaikeväärtusena kasutada 20°C. Paljusid geosünteedide omadusi katsetatakse temperatuuril 20±2°C. Kui see erineb kavandatavast kasutustemperatuurist tuleb määratud omadusi vastavalt korrigeerida.

Kui enamike rakenduste puhul on eluea ennustamise eesmärk tagada, et geosünteedi eluiga oleks pikem kui konstruktsiooni kavandatav eluiga, siis armeeritud/tugevdatud pinnaste puhul on lubatud tugevuse vähenemine pinnase konstruktsiooni eluea jooksul. Tugevus väheneb ajas mitmesuguste faktorite tõttu, nagu temperatuur, mehaanilised ja keemilised mõjurid. Tugevuse vähenemise arvestamiseks vähendatakse geosünteedi iseloomulikku tugevust vähendusfaktorite väärtuste võrra. Geosünteedi iseloomulik tugevus T_{char} , mida nimetatakse ka normtugevuseks, on defineeritud kui geosünteedi tõmbetugevuse 95% (kahepoolne) alumine usalduspiir, mis on ligikaudu võrdne keskmise tugevusega, millest on lahutatud kaks standardhälvet. See on ühtlasi ka tootja poolt garanteeritud tugevus. Vähendusfaktorid peegeldavad geosünteedi ümbritsevat keskkonda ning koormust, mis geosünteedil lasub.

Vähendusfaktori väärtus kestvusele eeldatava mõju puhul on alati suurem kui 1,0. Kui tugevuse vähenemist ei eeldata, siis kasutatakse vähendusfaktorina väärtust 1,0. ISO/TR 20432 standard määratleb vähendusfaktoreid järgmiselt:

- RF_{CR} on vähendusfaktor, mis arvestab pikaajalise staatilise koormuse mõjuga kavandatud kasutustemperatuuril. Tuleb tähele panna, et see vähendusfaktor ei arvesta dünaamilise koormusega;
- RF_{ID} on vähendusfaktor, mis arvestab mehaanilise kahjustusega paigaldamisel;
- RF_W on vähendusfaktor, mis arvestab ilmastiku kahjustava mõjuga paigalduse käigus või püsivalt, kui geosünteedi kasutatakse katmata kujul;
- RF_{CH} on vähendusfaktor, mis arvestab keemilistest ja bioloogilistest mõjudest lähtuva tugevuse vähenemisega kavandatud kasutustemperatuuril;

Lisaks tuleb arvesse võtta ka ohutusfaktorit f_s , mille eesmärk on võimaldada ekstrapoleerimise määramatust. See on eriti oluline ekstrapoleerimisel pikemale perioodile, võttes arvesse

vähendusfaktorite statistilist varieeruvust, kuid sealjuures mitte arvestades pinnase struktuurist ja koormuste arvutamisest lähtuvat määramatust.

Kõigi leitavate vähendusfaktorite ja ohutusfaktori väärtused tuleb korrutada, saadud korrutis tuleb jagada iseloomuliku tugevusega T_{char} ning saadakse pikaajaline tugevus T_D ehk jõud geosünteedi laiusühiku kohta (kN/m). Pikaajaline tugevus valemina väljendatuna:

$$T_D = \frac{T_{char}}{RF_{CR} \cdot RF_{ID} \cdot RF_W \cdot RF_{CH} \cdot f_s} \quad (3)$$

Erinevalt ISO/TR 20432 standardist arvestavad mitmete maade juhised, nagu näiteks Saksamaa EBGeo (mis on kasutusel näiteks ka Lätis) lisaks ülal mainitud neljale erinevale vähendusfaktorile ka geosünteedi omavaheliste ühenduskohtade/liitmike vähendusfaktorit ja geosünteedile mõjuvate dünaamiliste koormuste vähendusfaktorit. [EBGeo]

Vähendusfaktorid sõltuvad sellest, mis funktsiooni geosünteed konstruktsioonis täidab, erinevad koefitsiente tuleb kasutada sõltuvalt sellest kas armeeritakse mineraalmaterjale või asfaldikihte, muldkeha ja sellega seonduvat konstruktsiooni, kihtide eraldamist, erosiooni, drenivat või filtreerivat funktsiooni.

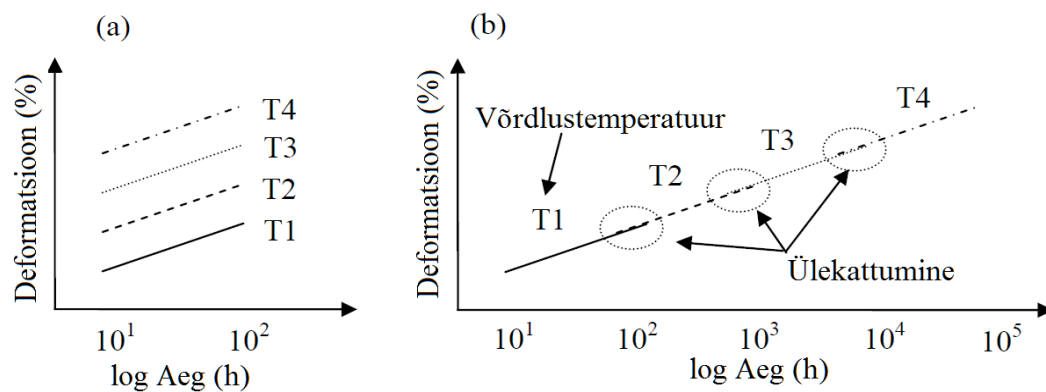
3.2.1 Roomedeformatsioon ja roomepurunemise vähendusfaktor RF_{CR}

Roomedeformatsiooni ja -purunemise katsed tuleb läbi viia vastavalt ISO 13431 (või ASTM D5262). Roomedeformatsiooni kirjeldamisel esitatakse tulemused tavaliselt deformatsiooni sõltuvusena aja logaritmilisest väärtusest $\log(t)$. Katse tulemused võib sellises skaalas ekstrapoleerida kuni kavandatud kasutusea lõpuni, kasutades aja-temperatuuri superpositsiooni meetodit (time-temperature shifting/superposition ehk TTS). See võimaldab ennustada roomekäitumist mingil võrdlustemperatuuril oluliselt pikema ajavahemiku jooksul, kui kuluks reaalse mõõtmiste sooritamiseks.

Kõigepealt viiakse roomekatsed läbi erinevatel temperatuuridel, kuid kindla deformatsiooni juures ja samal ajavahemikul. Seda kirjeldab joonis 4(a). Seejärel nihutatakse roomekõveraid ajateljel mingi võrdlustemperatuuri T_1 suhtes nii, et toimub kõverate otste ülekattumine ja moodustub üks roomekõver nn peakõver (master curve). Seda kirjeldab joonis 4(b).

Tulemuste õigsuse kontrollimiseks tuleb leida ka nihkefaktorite sõltuvus temperatuurist, mis peaks olema lineaarne või ühtlane kõverjoon. Nihkefaktor on väärtus, mille võrra roomekõverat $\log(t)$ telje suhtes peakõvera saamiseks nihutati. Katselised kogemused näitavad, et deformatsioonid koormamisel varieeruvad, kuid kuna deformatsiooni muutus ajas on väike, siis toob see varieeruvus kaasa laia nihkefaktorite varieeruvuse. [ISO/TR 20432]

Selle varieeruvuse vähendamiseks saab kasutada astmelist isothermist meetodit (stepped isothermal method ehk SIM) vastavalt ASTM D6992 standardile. Astmelise isothermise meetodi puhul katsetatakse mitmete katsekehade asemel ühte katsekeha, mille temperatuuri peakõvera saamiseks astmeliselt tõstetakse. Astmeline isothermiline meetod tegelikult põhineb aja-temperatuuri superpositsiooni meetodil ning on selle protseduuri üks külgharu. [ASTM D6992]



Joonis 4. Aja-temperatuuri superpositsioon. (a) erinevatel temperatuuridel mõõdetud algsed roomekõverad, (b) roomekõverate horisontaalse nihkega saadud protsessi põhigraafik [Nielsen, 1974].

Roomekatse tulemusi saab väljendada ka isokroonidena. Vastava graafiku koostamiseks viiakse kõigepealt läbi roomekatsed erinevatel koormustel ja esitatakse tulemused deformatsiooni sõltuvusena ajast, tavaliselt kindla ajavahemikul 1, 10, 100 jne tundi kuni kavandatud kasutuseani välja. Viimase leidmisel tuleb üldjuhul kasutada ekstrapoleerimist. Seejärel koostatakse uus graafik, mis esitavad deformatsiooni sõltuvust koormusest eelnevalt nimetatud ajaperioodidel. Isokroone kasutatakse peamiselt siis kui tugevdatud konstruktsiooni projekteerimisel on ära täpsustatud lubatud deformatsiooni ulatus mingi aja jooksul. Sel juhul on kõige mugavam maksimaalse lubatud koormuse info leidmiseks just isokroonselt graafikult. Oluline on ka märkida, et isokroone ei või kasutada hindamaks deformatsiooni purunemiseni. [EBGEO; Greenwood, Schroeder ja Voskamp, 2012]

Roomepurunemise ja vähendusfaktori RF_{CR} määramiseks tuleb vastavalt standardile ISO 13431 testida vähemalt 12 katsekeha, millest nelja tuleb testida ajavahemikus 100 – 1000 tundi, minimaalselt nelja ajavahemikus 1000 – 10 000 tundi ning vähemalt ühe katsekeha purunemise aeg peab olema enam kui 10 000 tundi. On soovitatav võrdluseks määrata ka samast partiist materjali tõmbetugevus T_B vastavalt EVS-EN ISO 10319 või ASTM D4595 standardile. Nii tõmbe- kui ka roomekatse puhul tuleb kasutada samu või sarnaseid haaratseid ning selles suunas, kus jõud (tee)konstruktsioonides mõjuvad. Roomepurunemise kõveral väljendatakse roomekatset rakendatavat koormust T protsendina materjali tõmbetugevusest T_B ning esitatakse sõltuvusena aja logaritmilisest väärtusest $\log t_R$, mis kulus purunemiseks. Lineaarse regressiooni ja vähimruutude meetodi abil saadakse lähendusjoon, mis võimaldab prognoosida vähendusfaktorit kavandatud kasutusea lõpus. Selleks leitakse lähendusjoonel T väärtus kasutusea lõppu tähistaval ajahetkel t_D ja arvutatakse vähendusfaktor RF_{CR} :

$$RF_{CR} = \frac{100}{T} \quad (4)$$

Roomepurunemise protsessi kiirendamiseks võib kasutada kõrgendatud temperatuure ja tulemusi ekstrapoleerida pikemale perioodile. Roomepurunemise katsed viiakse läbi erinevatel temperatuuridel ning ekstrapoleerimiseks kasutatakse peamiselt aja-temperatuuri superpositsiooni ja astmelist isotermilist meetodit. Aja-temperatuuri superpositsiooni meetodi kasutamisel on kiirendatud katsetustel saadud roomepurunemise kõverate nihutamine natuke erinev tavapärasest roomedeformatsiooni kõverate nihutamisest.

Nagu ka eelnevalt mainitud, siis ekstrapoleerimisel aja-temperatuuri superpositsiooni meetodil tuleb algse deformatsiooni tulemuste hajuvuse tõttu kontrollida nende õigsust korduvate

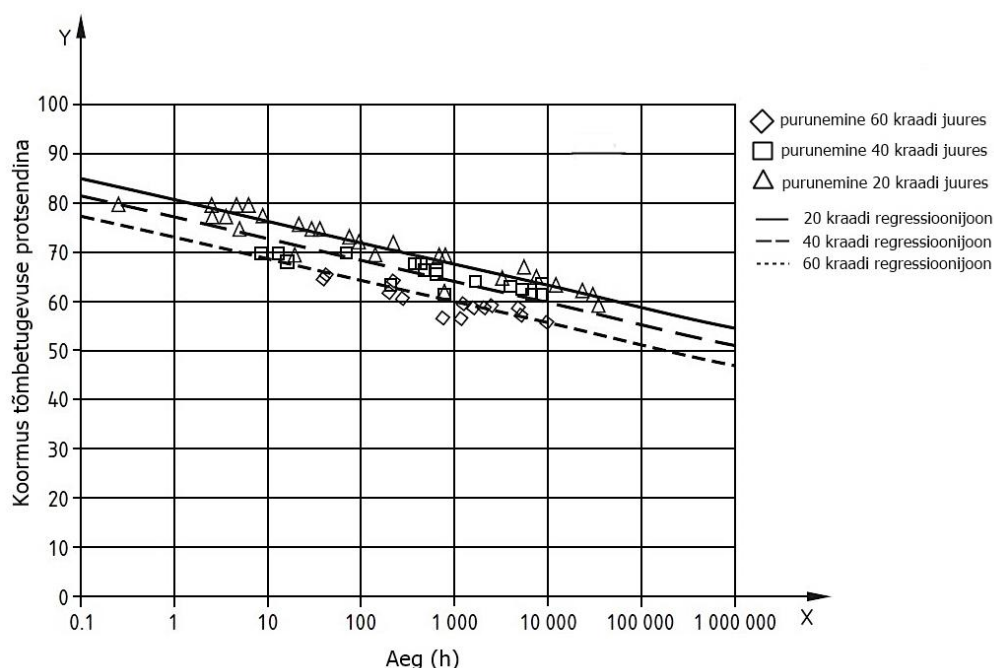
katsetega ning hajuvuse vähendamiseks kasutatakse astmelist isotermilist meetodit. Antud meetodil saadud tulemused peavad aga olema kokkusobivad aja-temperatuuri superpositsioon meetodil ning andmeplokkide nihutamise meetodil saadud tulemustega. ISO/TR 20432 standard annab järgnevad soovitusel astmelisel isotermilisel meetodil ja tavapärasel ehk mitte kiirendatud katsetustel saadud tulemuste kombineerimiseks vähendusfaktori RF_{CR} leidmiseks:

- Tuleb leida vähemalt 6 andmepunkti, mis on saadud tavapärasel katsetusel ning mille puhul on koormused valitud nii, et saaks määrata neli katsepunkti vahemikus 100 ja 10 000 tundi ning vähemalt ühe 10 000 tundi või enam.
- Tuleb leida vähemalt 6 andmepunkti, mis on saadud kiirendatud katsetustel, millest vähemalt kolm punkti on leitud deformatsioonikõverate nihutamise kaudu saadud peakõveralt ajavahemikus 1 000 ja 100 000 tundi ning kolm punkti ajavahemikus 100 000 ja 10 000 000 tundi.

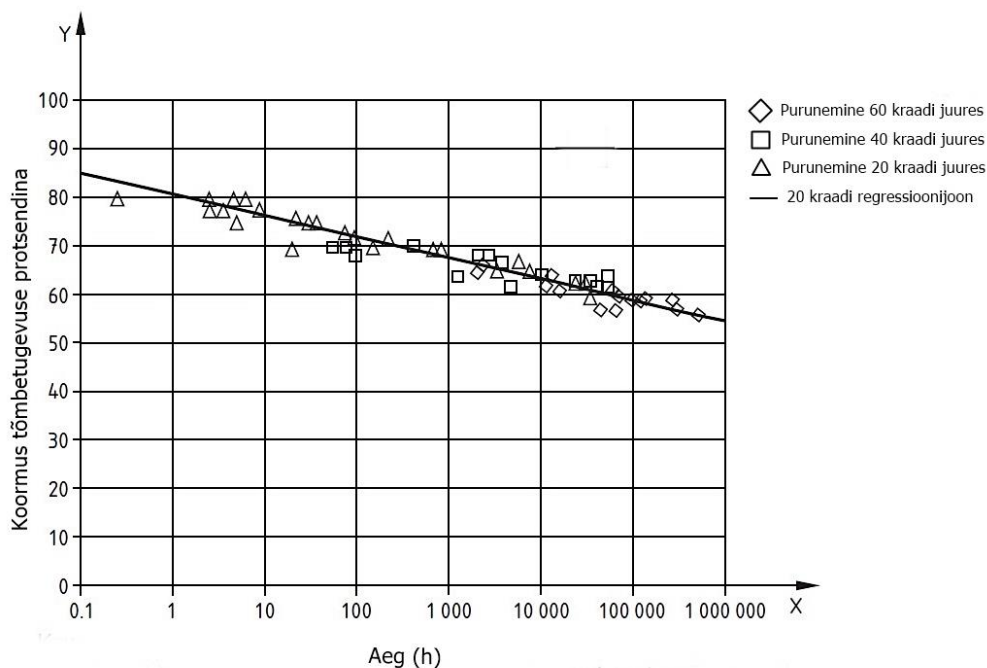
Nii tavapärase kui ka kiirendatud katsetuste tulemuste põhjal tuleb läbi viia lineaarse regressiooni analüüs ja arvutada RF_{CR} valemi 4 alusel 2000 ja 10 000 tunni juures. Mõlemal juhul, tavapärasel ja kiirendatud katsetustel 2000 ja 10 000 tunni juures leitud RF_{CR} väärtuste erinevus ei tohi olla enam kui 0,15 võrra. Kui need tingimused on täidetud, siis võib kõik tulemused regressioonisirge saamiseks ühendada. Vastasel juhul tuleb kasutada tavapäraseid meetodeid.

Kiirendatud katsetuste põhjal on selgitatud, et mitmete geosünteedide tugevus ei vähene koormuse all oluliselt kuni nende kavandatud kasutusea lõpuni. See tähendab, et pikaajaline koormus esindab degradatsiooni 3. režiimi. Kui rakenduv koormus on eeldatavasti väiksem kui vähendusfaktori RF_{CR} ja materjalile iseloomuliku tugevuse T_{char} korrutis, siis on otstarbekas materjali purunemiseks kuluv aeg arvutada lähtuvalt nimetatud rakenduvast koormusest ja kontrollida, et see ületaks oluliselt disaini eluea t_D väärtust. Selle põhjal võib olla kindel, et tugevus püsib materjalile iseloomuliku tugevuse T_{char} piires kogu kavandatava kasutusea jooksul. See on eriti oluline seismilise aktiivsusega piirkondades ja muudel juhtudel kus eeldatakse teatavat tugevuse varu. [ISO/TR 20432]

(A)



(B)



Joonis 5. (A) Roomepurunemise regressioonijooned ning neile vastavad punktid 20, 40 ja 60°C juures. (B) 20°C regressioonijoon suunas nihutatud 40°C ja 60°C regressioonijooned ning nende punktid. [ISO/TR 20432]

Kui geosünteedi pikaajalist vastupidavust ei ole testitud, tuleb kasutada Transpordiameti kodulehel olevast uuringu „Muldkeha projekteerimine (sh. arvutused) ja tüüplahenduste väljatöötamine (sh. geosünteedika kvaliteedikontrolli arendamine)“ lisast 3 „Geosünteedide kasutamine tee konstruktsioonis“. Informatsiooniks on toodud EBGEO soovitatavad roomepurunemise vähendusfaktorid tabelis 5.

Tabel 5 Soovitatavad roomepurunemise vähendusfaktorid RF_{CR} tulenevalt EBGEO

Material	Acronym	Common values for A_1 from product-specific analyses		Minimum A_1 if analysis unavailable
		from	to	
Aramid	AR	1.5	2.0	3.5
Polyamide	PA	1.5	2.0	3.5
Polyethylene	PE	2.0	3.5	6.0
Polyester	PET	1.5	2.5	3.5
Polypropylene	PP	2.5	4.0	6.0
Polyvinyl alcohol	PVA	1.5	2.5	3.5

Note: Where analysis results are unavailable the values of A_1 given in the table above have been increased compared to the previous edition of these Recommendations, because the values could not be confirmed as 'conservative' due to the great diversity of products and manufacturer's data available (see additional notes in [5]).

:

3.2.2 Keemilise ja bioloogilise mõju vähendusfaktor RF_{CH}

Keemilisest ja keskkonna mõjust tuleneva geosünteedi tugevuse vähenemise ennustamine on kahtlemata kõige keerulisem. Geosünteedide keemilise degradatsiooni peamiseks põhjusteks on PET puhul hüdroolüüs ja polüolefiinide puhul oksüdatsioon ning selle mõju hindamiseks geosünteedi vastupidavusele tuleb lähtuda paigaldistest kogutud tõendusmaterjalidest või kiirendatud katsetest.

Vastavalt ISO 13437 standardile võib koguda tõendeid vananemise esinemise või selle kiiruse kohta asjakohasesse keskkonda paigaldatud proovide väljakaevamise järel. Keskkonnas hoidmise aeg peab olema piisavalt pikk, et selle mõju tulemusi ekstrapoleerida kogu kavandatud kasutusea ulatuses. See on eriti oluline, kui pikale inkubatsiooniperioodile järgneb omaduste kiire halvenemine. PET, mille puhul toimub tavaliselt degradatsiooni 2. režiimi järgi on seega 50 – 100 aastase kasutusea ulatuse ekstrapoleerimiseks vaja rakendada keskkonna mõju vähemalt 10 aastat. Polüolefiinide puhul toimub aga oksüdatsioon degradatsiooni 3. režiimi järgi ning see tähendab, et keskkonna mõju on vaja rakendada veelgi pikema perioodi vältel, kuna mehaanilised omadused hakkavad vähenema alles peale antioksidandi lõppemist. Kuna tõendite kogumise meetodi puhul on katseperiood väga pikk, siis on eelistatum keemilise mõju uurimise meetod kiirendatud degradatsiooni katsed. Vastavalt ISO/TR 20432 standardile rakendatakse kiirendatud katsete puhul kõrgendatud temperatuuri või materjali mõjutavate keemiliste ühendite suuremat kontsentratsiooni või mõlemat. Katse käigus toimuva vananemise kiiruse ja kiirendatud vananemise kiiruse vahelise sõltuvuse loomiseks kasutatakse Arrheniuse võrrandit:

$$k = Ae^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (5)$$

kus k on degradatsiooni kiirus,

A on eksponentsiaalne tegur, iga keemilise reaktsiooni konstant,

E_A on protsessi aktivatsiooni energia (J/mol),

R on universaalne gaasi konstant (8,314 J/mol·K),

T on absoluutne temperatuur Kelvinites.

Katsetuse läbiviimiseks tuleb:

1. Määrata mõõdetav parameeter, näiteks jääktugevus 90% võrreldes algse tugevusega.
2. Valida vanandamise keskkond, vastavalt sellele kuhu geosünteed paigaldatakse. Selleks võib olla vesi või spetsiifiline keemiline keskkond. Viimase puhul on oluline silmas pidada, kas paigalduskeskkonna pH on <4 või >9 , siis tuleb kasutada sukeldumismeetodit, mida kirjeldavad nii ISO 12960 kui ka ASTM D5322-17 standard.
3. Valida 3 kuni 4 temperatuuri, tavaliselt sammuga 10°C . Sealjuures silmas pidades, et kavandatavatel temperatuuridel katse mahuks katseprogrammi, kuna madalamatel temperatuuridel toimuvad reaktsioonid üldiselt aeglasemalt ning et madalaim katsetemperatuur ei oleks kõrgem kui 25°C geosünteedi kasutustemperatuurist. Lisaks arvestades materjalis toimuvaid füüsikalisi

üleminekuid, nagu sulamine või klaasisiire. Kui sellised üleminekud siiski toimuvad, siis tuleb tõestada, et neil ei ole vananemise kiirusel olulist mõju. Seda tõestab näiteks katsetulemuste paigutumine sirgjoonele Arrheniuse graafikul.

4. Mõõta valitud parameetri, näiteks tugevus, vähenemine iga keskkonna ja temperatuuri juures sõltuvalt ajast. Tulemuste põhjal tuleb koostada graafik.
5. Lähtudes Arrheniuse võrrandist tuleb koostada graafik aja, mis kulus valitud parameetri, näiteks 90% jääktugevuse, saavutamiseks vastava absoluutse temperatuuri (Kelvinites) pöördväärtuse $1/T_K$ juures. Arrheniuse valem kehtib siis kui graafik on sirgjooneline. Vastasel juhul pole ekstrapoleerimine võimalik.
6. Tuleb leida regressioonijoon ja alumine usalduspiir. Regressioonijoonelt tuleb leida aeg t_s , kus on määratud jääktugevus kasutustemperatuuril $x = \frac{1}{T_s}$; alumise usalduspiiri joonelt tuleb leida aeg t_{AU} , kus on samuti määratud jääktugevus kasutustemperatuuril.
7. Joonistada degradatsiooni kõver, lähtudes 90% jääktugevuse saavutamisest aja t_s jooksul. Saadud kõveralt tuleb leida pikaajaline tugevus T_{char} (%) vastavalt tootja lubatud toote elueale ja arvutada vähendusfaktor:

$$R_{CH} = \frac{100}{T_{char}} \quad (6)$$

8. Sarnaselt tuleb tuletada ka degradatsiooni alumise usalduspiiri kõver (AU), vastavalt siis ka 90% jääktugevuse saavutamisest aja t_{AU} jooksul. Kõveralt tuleb leida alumise usalduspiiri pikaajaline tugevus T_{AU} (%) vastavalt tootja lubatud toote elueale ning arvutada suhe, mis tähistab Arrheniuse valemist tuletatud tugevuse määramatust:

$$R_2 = \frac{T_{char}}{T_{AU}} \quad (7)$$

Bioloogilisel degradatsioonil ei ole teadoleval suurt mõju geosünteedide, eriti just geovõrkude vastupidavusele. Seda peamiselt seetõttu, et bakterid ja seened ei suuda geovõrkudes enim kasutatavate kõrge molaarmassiga polümeeride, nagu PE, PP ja PET ahelaid lõhkuda ning pinnase tugevduste kõrge tõmbetugevus hoiab ära ka nende kahjustumise juurte või loomade poolt, kes endale urge elupaigaks teevad. Sel põhjusel ei pea üldiselt arvestama bioloogilise degradatsiooniga vähendusfaktori RF_{CH} arvutamisel. Arvestama peab sellega kindlasti juhul kui geosünteedi tootmisel kasutatakse mõnda muud polümeeri, mida tavaliselt ei kasutata geosünteedides. Sel juhul tuleb vastavalt EVS EN 12225 standardile määrata, kas bioloogilise tegevuse tagajärjel toimub omaduste vähenemine.

Kui geosünteedi keemilisele keskkonnale vastupidavust ei ole testitud, tuleb kasutada Transpordiameti kodulehel olevast uuringu „Muldkoha projekteerimine (sh. arvutused) ja tüüplahenduste väljatöötamine (sh. geosünteedika kvaliteedikontrolli arendamine)“ lisast 3 „Geosünteedide kasutamine tee konstruktsioonis“. Informatsiooniks on toodud EBGeo soovitatavad roomepurunemise vähendusfaktorid tabelis 5 keemilise keskkonna mõju vähendusfaktorid ilma katsete tulemusteta pH vahemikus 4 kuni 9 on toodud tabelis 6.

Tabel 6 Soovitavad roomepurunemise vähendusfaktorid RF_{CR} tulenevalt EBGeo

Table 2.3 Reduction factor A_4 (without analysis, $4 \leq pH \leq 9$)

Material	Acronym	A_4
Aramid	AR	3.3
Polyamide	PA	3.3
Polyester	PET	2.0
Polyethylene	PE	3.3
Polypropylene	PP	3.3
Polyvinyl alcohol	PVA	2.0

Due to their alkali sensitivity, polyester and aramid products may not be used in building applications for extended periods when in contact with soils improved or strengthened using cement or lime, or in direct contact with cement concrete (including crushed concrete), regardless of the operational life. An exception is made if their suitability is determined by additional, product-specific investigations or by proof of appropriate long-term experience and measurements.

3.2.3 UV-kiirguse mõju vähendusfaktor RF_w

UV-kiirgus mõjutab geosünteti üldjuhul ainult paigaldamisel, mil see on veel pinnases katmata või ootab rullis ehitusobjektile. ISO/TR 20432 kohaselt ei pea geosünteedi vastupidavuse ennustamisel arvestama UV-kiirguse vähendusfaktoriga RF_w kui geosünteed on UV-kiirguse käes maksimaalselt 12 tundi.

Kui see aeg on pikem, siis tuleb vastavalt EVS-EN 12224 standardile läbi viia kiirendatud ilmastikukindluse indekstest, mis põhineb ühe kuu vältel 50 MJ/m^2 juhusliku ultraviolettkiirguse käes olemisel ning pärast kokkupuudet UV-kiirgusega geosünteedi jääktugevuse leidmisel.

Kui muutus tugevuses ei ole vähenenud rohkem kui 5% ning geosünteed ei ole katmata kauem kui 1 kuu, siis ei pea vähendusfaktorit arvestama. Muudel juhtudel tuleb vähendusfaktor leida. Tabelis 5 on ära toodud vähendusfaktorid vastavalt jääktugevusele ja katmata oleku ajale.

Tabel 7. Geosünteedi paigaldamisel katmata oleku aeg. [ISO/TR 20432]

Jääktugevus pärast EN 12224 indekstesti	Lubatud katmata oleku aeg ehitusobjektile	Vähendusfaktor RF_w
>80%	1 kuu	1/jääktugevuse %
60% - 80%	2 nädalat	1.25
<60%	1 päev	1.0
Testimata materjal	1 päev	1.0

3.2.4 Mehaaniliste kahjustuste vähendusfaktor RF_{ID}

Jämedad ja või terava kujaga täitematerjalid ja rasked tihendamiskoormused võivad geosünteedi kahjustada, põhjustades kohest tugevuse vähenemist (degradatsiooni režiim 1). Seda loetakse paigaldamise kahjustuseks, millele vastav vähendusfaktor on RF_{ID} . Mehaaniliste kahjustuste mõju hindamiseks geosünteedi tugevusele ja deformatsioonile tuleb läbi viia kahjustusi simuleeriv test, kus kasutatakse võimalikult sarnaseid tingimusi geosünteedi reaalsele paigaldustingimustele. Vastavalt EVS-EN ISO 13437 standardile peab simuleerivas testis kasutama sama:

- Täiteainet geosünteedi all ja peal, seda nii osakeste suurusjaotuse, kõvaduse ja nurgelisuse poolest.
- Sügavust, kuhu geosünteed paigaldatakse
- Tihendamise meetodit ja astet
- Võtma arvesse, kas materjalist sõidetakse mõne sõidukiga üle enne tihendamist.

Kahjustustega ja kahjustusteta katsekehade (peavad olema võetud samast rullist vastavalt EVS EN ISO 9862) tõmbetugevust tuleb testida vastavalt EVS-EN ISO 10319 standardile. Vähendusfaktor RF_{ID} väljendatakse kahjustamata katsekehade tõmbetugevuse keskmise ja kahjustatud katsekehade tõmbetugevuse keskmise vahelise suhtena.

Kohaspetsiifiliste andmete puudumisel on võimalik kasutada ka interpolatsiooni. Kui vaadeldava materjali vähendusfaktor on teada pinnaste puhul, mille tera suurus on väiksem ja suurem kui kasutatav pinnas, siis on võimalik kasutada interpolatsiooni ning leida vahepealne vähendusfaktor. Lisaks on võimalik kasutada interpolatsiooni nende materjalide korral, mille puhul on võimalik luua seos massi, tõmbetugevuse jms näol. Sel juhul peab vähendusfaktor olema teada vaadeldavast materjalist kergema (nõrgema) ja raskema (tugevama) materjalil.

3.2.5 Täiendavad vähendusfaktorid ja ohutusfaktor

Geosünteedide pikaajalise vastupidavuse hindamisel tuleb teatud juhtudel arvestada lisaks roome, ilmastiku, keemilise ning paigaldamiskahjustuste mõjule ka dünaamiliste koormuste ja geosünteedide omavaheliste ühenduskohtade mõjuga.

Vähendusfaktor A3 arvestab geosünteedi tugevuse vähenemist kohtades, kus geosünteedid on omavahel ühendatud õmbluste, liitmikute, liimi või mõnel muul moel, aga ka kohtades kus geosünteedide otsad on kinnitatud konstruktsioonelementide, nagu sein, plokk või ankur, külge. Sellistel juhtudel tuleb analüüsida tõmbejõudude ülekannet. Lihtsaim viis vähendusfaktor A3 määramiseks EVS-EN ISO 10321 tõmbekatse põhjal, kus vähendusfaktor saadakse ilma ühenduskohtadeta geosünteedi tõmbetugevuse jagamisel ühenduskoha tõmbetugevusega. Vähendusfaktor A3 loetakse võrdseks 1.0, kui tõmbe suunas ei ole ühenduskohti.

Kui geosünteed on paigaldatud kohta, kus mõjuvad dünaamilised ehk muutuvad koormused, näiteks vahetult katte või veermiku all, raudteel, sillakonstruktsioonides ja võimalikes maavärinariskiga piirkondades, siis tuleb arvestada seda mõju ka geosünteedi pikaajalise vastupidavuse ennustamisel vähendusfaktorina A5. Kohtades, kus mõjuvad ainult staatilised koormused loetakse vähendusfaktor A5 võrdseks 1.0.

Igasuguse ennustamisega kaasneb teatav ebamäärasus ning ohutusteguri f_s eesmärk ongi võimaldada ekstrapoleerimise määramatust, mis on oluline just pikaajaliste ekstrapoleerimiste korral.

Vastavalt ISO/TR 20432 standardile tuleb ekstrapoleerimise määramatust arvestada:

1. Roomepurunemisel, kus $R_1 = 1,2^{r-1}$ (8) ning $r = \log\left(\frac{t_D}{t_{max}}\right)$ (9), kus t_{max} viitab pikimale ajale, mis kulus roomepurunemiseks tundides ja t_D disaini elueale.
2. Keemilisel vanandamisel, kus suhe $R_2 = \frac{T_{char}}{T_{AU}}$ (7) tähistab Arrheniuse valemist tuletatud tugevuse määramatust.

Ohutusteguri f_s arvutamiseks kasutatakse järgmist valemit:

$$f_s = 1 + \sqrt{((1 - R_1)^2 + (1 - R_2)^2)} \quad (10)$$

Soovitatav minimaalne f_s väärtus on 1,2.

3.3 Geosünteedide käitumine madalatel temperatuuridel

3.3.1 Geosünteedid erinevatel temperatuuridel

Eesti paikneb piirkonnas, kus temperatuur võib varieeruda talvisest -30°C kuni suvise $+30^\circ\text{C}$ (teepinnal kuni 60°C), seega vahemikus enam kui 60°C .

Selleks, et mõista geosünteedika käitumist nii madalatel kui ka kõrgematel temperatuuridel tuleb mõista, kuidas temperatuur mõjutab polümeeride keemilisi ja füüsikalisi omadusi.

Keemilised omadused ja mehaaniline vastupidavus on temperatuuri poolt mõjutatavad. Keemiliste reaktsioonide aktiivsus kahaneb üldiselt koos temperatuuri alanemisega. Seega võib üldiselt eeldada, et temperatuuri alanedes keemiline vastupidavus pigem paraneb.

Mehaanilised omadused madalal temperatuuril sõltuvad ennekõike sellest, kas polümeerne geosünteed on klaasi- või kummiolekus. Klaasiolekus on võimalik ainult aatomite piiratud liikuvus, purustamiseks vajalik jõud on üldjuhul suurem kuid sellega kaasnev pikenemine väiksem. Kummiolekus on võimalik makromolekulide laialdasem liikuvus ja ka roome, seega suureneb deformeeritavus enne purunemist kuid tugevus väheneb.

Geosünteedide kasutuses esineb nii lühiajalisi kui ka pikemaajalisi koormamisi ning kasutustemperatuur ei ole püsiv vaid muutub aastaegade vaheldumisega tsükliliselt. Materjali pikaajalist vastupanu deformeerivatele jõududele teataval temperatuuril iseloomustab roome ja lühiajalist vastupanu kirjeldab purunemispinge/jõud ja sellega kaasnev purunemisdeformatsioon/pikenemine kiirel purustamisel. Materjali võib katsetada püsivalt madalal temperatuuril, laiemas temperatuurivahemikus (et selgitada klaasiolekust kummiolekusse ülemineku mõju) kui ka tsükliliselt temperatuuri varieerides.

Järgnevalt kirjeldatakse temperatuuri mõju geosünteedide lühi- ja pikaajalisele käitumisele keskendudes ennekõike madalate temperatuuride mõjule.

3.2.2 Geosünteedide mehaaniliste omaduste temperatuurisõltuvus

Geosünteedide lühiajaliste mehaaniliste omaduste temperatuurisõltuvust kaasates ka külmumispiirist madalamaid temperatuure on vähe uuritud. Kokkuvõtte olulisematest uuringutest on järgnev.

[Allen et al., 1982] ja [Allen et al., 1983] viisid läbi erinevate polüpropüleenist (PP) ja polüetüleenterftalaadist ehk polüestrist (PET) geosünteedide võrdlevad tõmbekatsed temperatuuridel 22°C ja -12°C. Ka katsetasid nad nimetatud geosünteede peal 50 külmatsükli vahemikus 22°C ja -15°C. Nad leidsid et

- tõmbetugevus temperatuuridel 22°C ja -12°C erineb vähe,
- teostatud külmatsüklid ei mõjutanud geosünteedide mehaanilisi omadusi,
- roomekäitumist tõmbel mõjutas enim geosünteedi tootmismeetod,
- PP geosünteedi deformatsioonivõime tõmbel vähenes madalamal temperatuuril.

[Henry ja Durell, 2007] uurisid PP geosünteedi tugevusomadusi kuivalt ja märjalt, temperatuuridel 20°C kuni -54°C. Nad leidsid, et märja katsekeha tugevus kasvas kuivaga võrreldes temperatuuri alanemisel 0°C kuni -54°C.

[Wang, 2008] uuris HDPE geovõresid ja leidis, et tõmbetugevus suurenes 1,2 korda ja purunemispikenemine vähenes 30% temperatuurivahemikus 15°C kuni -35°C

[Yuan, 2017] uuris spetsiaalseid geosünteede, mis eemaldavad teekonstruktsioonist niiskust ja leidis neil olevat külmatsüklite suhtes positiivse mõju.

[Han ja Jiang, 2013] järeldavad, et geosünteede võib edukalt kasutada külmas kliimas armeeringuteks, drenaažiks ja kapillaarseks barjääriks. Madalatel temperatuuridel on geosünteedidel suurem jäikus ja tõmbetugevus. Purunemispikenemine väheneb ja see on negatiivne nähtus, millega tuleb paigaldiste projekteerimisel arvestada. Niiskus ja peenikesed pinnaseosakesed võivad lausmaterjalidest geotekstiile aga külmumistemperatuurist madalamatel temperatuuridel tugevdada.

[Bonthron ja Jonsson, 2017] viisid läbi rea katseid erinevatele PP ja PET geosünteedidele toatemperatuuril ja sellest madalamatel temperatuuridel. Ka katsetasid nad paigalduse mõju erinevatel temperatuuridel. Tulemuste kokkuvõtte on järgmine:

- PP geosünteedide purunemisdeformatsioon vähenes kuni 38% ja PET geosünteedide purunemisdeformatsioon kuni 50% kui temperatuur alanes +20°C kuni -20°C.
- PP geosünteedide tõmbetugevus suurenes kuni 45% ja PET geosünteedide tõmbetugevus kuni 13% kui temperatuur alanes +20°C kuni -20°C. Elastsusmooduli kasv oli veelgi suurem, vastavalt kuni 71% ja 55%.
- Paigaldusest tekkiva kahjustuse määr kasvas temperatuuri alanemisega. PP ekstrudeeritud geovõre kahjustuse temperatuurisõltuvus oli suurem kui kootud PET geovõre oma.

Eelnevaid tulemusi kinnitab ka Tallinna Tehnikaülikoolis 2018 aastal tehtud uuring. Geosünteedide katsekehadele teostati 30 külmatsükli, -18°C, 8h ja +20°C, 16h vastavalt GOST P 55032 millele järgnes mehhaaniline katsetus vastavalt standardile EVS-EN ISO 10319. Mõju

oli üldjuhul vähene. Külmatesüklite mõjul kahanesis tõmbetugevus ja tõmbepikenemine keskmiselt mitte enam kui 10%, jäädes valdavalt katse vea piiridesse. Ühe PP geotekstiili puhul oli vähenemine siiski 20% ja enam. Selle erandi põhjust ei selgitatud.

Ka viidi Tallinna Tehnikaülikoolis läbi külmpainutuse katse vastavalt standardile GOST P 55033 temperatuuridel -10°C, -20°C and -30°C. Katseks valitud materjalidest avaldus külmpainutuse mõju ainult polüpropüleenist valatud geovõrgule, millel esines kahjustusi masina ristisuunas temperatuuridel -20°C ja -30°C. Antud materjal oli teistest oluliselt suurema paksusega ja tema taluvus väikese painderaadiuse osas ilmselt madalam. Kahjustused ilmsid temperatuuril, mis on madalam antud geosünteedi materjali eeldatavast klaasisiirdetemperatuurist (-10°C).

Eelnevatega sarnastele järeldustele on jõudnud ka teistes uuringutes.

Kõrgemad temperatuurid muudavad plastid üldiselt pehmemaks aga madalad temperatuurid jäigemaks. Geosünteedide paindumus kasvab kõrgemal temperatuuril, madalam temperatuur muudab need hapramaks ning vähendab löögikindlust. Üldiselt ei ole madal keskkonna temperatuur geosünteedidele degradatsiooni mõttes probleemiks, va. äärmuslikud olud ning paigalduse mõjud äärmuslikes oludes. Nt. PP materjalist geosünteed võib saada paigaldusel kahjustatud kui temperatuur on alla 0°C [Koerner, 2016].

On leitud, et PET geosünteedide tõmbetugevus kasvab temperatuuri kahanemisel alla 20°C ja purunemisdeformatsioon kahaneb. Tõmbetugevuse kasvu kiirus on ligikaudu 0.33% Celsiuse kraadi kohta. Purunemisdeformatsioon väheneb ligikaudu 11%, kui temperatuur alaneb 60°C kuni 0°C. [Petriaev ja Konen 2008]

Ka geosünteedide tootjate juhendmaterjalides jõutakse sarnastele järeldustele. Külmakindlust peetakse oluliseks omaduseks, kui geosünteedi kasutatakse külmaes piirkondades nagu Euroopa ja Aasia põhjapoolsed piirkonnad sh Põhja-Skandinaavia. Eriti külmaes tingimustes kasvab materjali tõmbetugevus koos tõmbepikenemise mõneprotsendilise vähenemisega. Protsess on temperatuuri tõusul pöörduv. Ei kuiva ega märja DuPont™ Typar® SF materjali puhul ei täheldatud olulisi tugevuse muutusi peale 4 külmatesüklit temperatuuri vahemikus 0 kuni -18°C. Vee esinemine ei ole ka oluline, kuna see PP põhine materjal ei märgu. [DuPont]

3.2.4 Geosünteedide roomekäitumine madalatel temperatuuridel

Roome on ajast sõltuv deformatsiooni protsess, mis toimub materjali maksimaalse ehk purunemisinge väärtustest väiksemate pinge väärtuste juures. [Nielsen, 1974] Nii koormuse kui ka temperatuuri poolt mõjutatavat roome mehhanismi võib selgitada makromolekulide liikuvuse kaudu. Staatilise koormuse korral deformeerub materjal läbi ühe või mõlema atomaarse mehhanismi [Sang-Sik, 2007]:

- aatomite vaheliste (tugevate) kovalentsete sidemete nurkade või pikkuse muutumisel;
- makromolekulide või nende osade ümberpaiknemisel.

PET puhul peaaheas esinevate benseenituumade tõttu on makromolekulide omavaheline libisemine raskendatud ning seetõttu on see etapp on PET puhul vähene. Polüolefiinide (PE ja PP) puhul on makromolekul painduvam ning ei sisalda suuri liikuvust takistavaid rühmasid. Seetõttu esineb neil ka makromolekulide omavaheline libisemine ning ka üldiselt suurem roomedeformatsioon enne purunemist [Smeets et al., 2001].

Roomet mõjutab ka temperatuur, selle kasvades suureneb ka roome kiirus. Kuigi selliseid uurimusi ei ole palju, leidub siiski viiteid geosünteedide roomekatsetele, mis on läbi viidud üldjuhul vaikeväärtusena kasutatavast 20°C madalamal temperatuuril. (vt ka eelmine ptk)

Polüpropüleenist geovõrede roomekäitumise selgitamiseks rakendati aja-temperatuuri superpositsiooni printsiipi ja leiti, et temperatuuri suurendamine 10 kraadi võrra +10°C kuni +20°C suurendas ajaskaala koefitsienti 10 võrra ehk roomeprotsess toimus 10 korda kiiremini [Wrigley, 1987]. Ilmselt kehtib ka vastupidine, ehk temperatuuri alandamine antud vahemikus 10 kraadi võrra muudab protsessi 10 korda aeglasemaks.

Eelnev sõltuvus ei ole siiski absoluutne. Temperatuuri mõju sõltub polümeeri keemilisest koostisest ja struktuurist [Cazzuffi et al., 1997]. Temperatuur avaldab polüolefiinide (PP ja HDPE) geosünteedide deformatsiooni ajasõltuvusele selget mõju. HDPE puhul võib seda mõju vähendada molaarmassi ja maksomolekulide orienteerituse suurendamine [Bush, 1990]. Siiski on roomel rakendatava koormuse mõju mitu korda suurem kui temperatuuri mõju [Cazzuffi et al., 1997].

On leitud, et HDPE geovõre roomekäitumises avaldab temperatuur olulist mõju: kui +20°C juures on deformatsioon peale 1000 tundi koormamist (koormus 60% purunemispingest tõmbekatsel) 14% ja ning jätkab kasvamist siis -20°C stabiliseerub roome peale 200 tundi ainult 2,5% deformatsiooni juures [Wang et al., 2008].

Polüester käitub geosünteedides polüolefiinidest erinevalt. Sedagi materjali mõjutab temperatuur, kuid mõju on väiksem. PVC kattega polüester geovõre roomekatsetel (koormus ligikaudu 60% purunemispingest tõmbekatsel) leiti, et kõrgem temperatuur samal koormusel toob kaasa suurema deformatsiooni ja deformatsiooni kasvu kiiruse. Roomedeformatsiooni erinevus võib olla kuni 40%, kui võrrelda katseid temperatuuridel +10°C ja 40°C. Deformatsiooni kasvu kiiruse erinevus võib olla kuni 80%, kui võrrelda katseid temperatuuridel +20°C ja +40°C. Roomemoodul kahaneb temperatuuri kasvades. Madalamatel temperatuuridel stabiliseerub roomedeformatsiooni platooks lühema aja jooksul kui kõrgematel temperatuuridel. Eelnevast järeldub, et pikaajaline purunemiskoormus on kõrgematel temperatuuridel madalam (ja madalamatel temperatuuridel kõrgem) ning temperatuur geosünteedi paigalduskohal on oluline faktor, millega tuleb teekonstruktsiooni projekteerimisel arvestada [Hsieh ja Tseng, 2008].

Kui valdavalt viiakse roomekatse läbi konstantsel temperatuuril siis esineb ka uurimus, kus on selgitatud külmatsüklite mõju. Katseteks valiti erinevad koormused, 5%, 10% ja 20% purunemispingest tõmbekatsel. Esmalt rakendati valitud koormus +20°C juures ja oodati, kuni deformatsiooni väärtus stabiliseerub (193 tundi). Seejärel rakendati 10 külmatsüklit temperatuuride -20°C ja +20°C vahemikus. 5% koormusel on roome külmatsüklite suhtes väga tundlik. Esimese jahutusperioodi jooksul toimub katsekeha kokkutõmbumine (deformatsioon väheneb). Deformatsioon stabiliseerub 2-3 külmatsükli jooksul. Deformatsiooni väärtus peale stabiliseerumist ületab vähesel määral deformatsiooni väärtust enne külmatsükleid. 10% ja 20% koormusel reageerib geovõre külmatsüklitele aeglaselt. Peale ühte külmatsüklit kasvab deformatsioon koos temperatuuri kasvuga ja kahaneb koos selle alanemisega. Viimaks saavutatakse stabiilne väärtus, kuid eeldatakse, et deformatsiooni kasv jätkub ka peale külmatsüklite lõppu [Wang et al., 2008]. Eelnevast järeldub, et külmatsüklite mõju roomele on vaja põhjalikumalt uurida ning arvestada ka teekonstruktsioonide projekteerimisel.

3.3 Juhised geosünteedidega projekteerimiseks ja kasutusvaldkonna valikuks

Geosünteedidega projekteerimisel tuleb esmalt tuleb hinnata, milliseid geosünteedi funktsionaalseid omadusi on vaja lühi- ja/või pikaajaliselt.

Lühiajaliste omadusteks loetakse

1) mehaanilised omadused

- tõmbetugevus (ISO 10319),
- löögikindlus (EN 14574, ISO 12236, ISO 10722, ISO 13433),
- survekäitumine (ISO 25619-1, 25619-2),
- vastupidavus abrasioonile (ISO 13427);

2) hüdraulilised omadused

- filtreerimine (ISO 12956, EN 14150, EN 16416)
- läbilaskevõime (ISO 12958);

3) hõõrdeomadused (ISO 12957-1, 12957-2, EN 13738);

4) vastupidavus - mehaanilistele kahjustustele, ilmastikule (mõjude hindamine vastavalt EN 12224, EN 12226, EN 12447), keemilistele reaktsioonidele.

Pikaajalisteks omadusteks loetakse:

1) kulumiskindlus (ISO/TS 13434:2008);

2) vastupidavus mehaanilistele kahjustustele;

3) vastupidavus ilmastiku mõjudele;

4) keemiline vastupidavus (ISO 13434:2008);

5) tõmbekäitumine – tõmbetugevus (ISO 10319, ISO 10321), tõmbe-roomekäitumine (ISO 13431, ISO/TR 20432);

6) survekäitumine (ISO 25619-1, 25619);

7) mehaaniline lukustus – geovõre avade ja selle peale pandud granuleeritud materjali vaheline mehaaniline püsivus;

8) filtreerimine (ISO 10772) ja läbilaskvus (ISO 10776, ISO 11058);

9) kuivendus;

Tuleb arvestada ka võimalike väliste koormustega, näiteks 1) muutuva koormusega, kui ummik on maanteel või rong on laadungiga rööbastel. 2) pidev koormus, näiteks prahi hunnikud/mäed prügilas

Geosünteedide vastupidavust konstruktsioonide ühe osana mõjutavad mitmed parameetrid, nagu geosünteedi füüsikaline struktuur, kasutatud polümeeri olemus, tootmisprotsess, füüsikaline ja keemiline keskkond, ladustamise ja paigaldamise tingimused ning koormus, mida geosünteed toetab. Geosünteedil võib olla üks või mitu funktsionaalset omadust, mis on selle kavandatava rakenduse jaoks kriitilised, näiteks tõmbetugevus või läbilaskvus. **Oluline on teha vahet saadaolevate ja nõutavate funktsionaalsete omaduste ning nende väärtuste vahel. Saadaolev omadus on see, mis on geosünteedil olemas, aga nõutava omadus on minimaalne tase, mis on vajalik et geosünteed suudaks täita kavandatavat funktsiooni. Saadaolev omadus muutub eeldatavasti aja jooksul materjali degradatsiooni tõttu, kuid nõutav omadus ei tohi muutuda enne määratud aja möödumist.**

Geosünteedide planeeritav eluiga struktuurides otsustatakse projekteerimisel. Lühiajaliseks kasutamiseks kuni 5 aastat, ajutiseks kasutuseks kuni 25 aastat ning püsivaks kasutuseks üle 25 aasta, tavaliselt 50 või üle 100 aasta.

Eeldatava eluea lõppu peab projekteerija tagama varu, kindlustamaks, et kuna eluea lõpus geosünteedi omadused halvenevad, siis ületaks geosünteedi eluiga eeldatava eluea. Erinevus saadaolevate ja nõutavate omaduste väärtuste vahel tähistabki seda varu, mille peab kindluse mõttes juurde arvestama. Seda varu saab väljendada suhtena. Suhe võib olla väljendatud ka kui eluea lõpuni jõudmise ajana. Vähendusfaktorite arvutamine pinnase tugevdamise rakendustes on kirjeldatud standardis ISO / TR 20432.

Eluea lõpp on punkt ajateljel, kus saadaolevate omaduste kõver vastab nõutavate omaduste kõverale ning eeldatakse, sellest hetkest alates geosünteed ei pruugi oma funktsiooni enam täita. Polümeerse geosünteedi vastupidavus sõltub sellest, millest see koosneb, milliseid lisandeid ja täiteaineid on lisatud, milline on polümeeri mikrostruktuur, milline on kiudude geomeetria ning paigutus geotekstiilide valmistamisel, kui paksud on geosünteeetilised tõkked, milline on geovõrkude, -tõkete ja -kärgede ühenduste kvaliteet.

Pikaajaliste rakenduste puhul peab geosünteed olema keemiliselt ja bioloogiliselt vastupidav. Pinnase täiteaine või granuleeritud osakeste ja geosünteedi otsesest kokkupuutumine võib põhjustada mehaanilisi kahjustusi. Kergemad kahjustused on näiteks pinna kriimustused, hõõrumised või kiudude abrasioon. Tõsisemad on näiteks rebenemised, augud või lõiked. Võimalike kahjustuste tekkimist saab hinnata ISO 13437 ja ISO 10722 standardite põhjal.

Abrasioon ning dünaamiline koormus võivad samuti tekitada geosünteedile mehaanilisi kahjustusi. Abrasiooni mõju saab testida ISO 13427 standardi põhjal.

Geosünteedide vastupidavuse hindamisel tuleb arvestada kõigi keemiliste ja füüsikaliste protsessidega, mis võivad mõjutada geosünteedi omadusi kogu selle kasutuse vältel. Pikaajalise vastupidavuse hindamise protseduur koosneb järgmistest sammudest:

- Materjal - teada peab olema polümeeri ja muude komponentide üldine keemiline iseloom ning geosünteedi füüsikaline struktuur
- Funktsioon ja rakendus - teada peab olema geosünteedi funktsioon
- Keskkond – teada peab olema paigalduskeskkond ja temperatuur
- Degradatsiooni mehhanism – arvestama peab paigalduskeskkonna võimalikke riske
- Eluiga – nõutav eluiga peab oma kindlaksmääratud
- Eluea lõpp – määratud peab olema aeg, millal geosünteed eeldatavasti ei funktsioneerigi nii nagu peaks
- Geosünteede, mida kasutatakse vaid lühiajaliselt, nende vastupidavust ei pea testima, sest tõenäosus, et nad purunevad on üsna madal ja purunemise mõju ei oma olulist tähtsust geosünteedi ajutise vajaduse tõttu. Testida tuleks ilmastiku ja mehaaniliste kahjustuste mõju.
- Pikaajaliselt kasutatavate geosünteedide vastupidavust saab testida kiirendatud vanandamiskatsetega, suurendades degradatsiooni põhjustava teguri sagedust, kontsentratsiooni, intensiivsust (nt. UV kiirguse intensiivsus) või koormust; tõstes temperatuuri. Täpsem info kiirendatud vanandamise kohta ISO/TR 20432 standardis.

4. Osalemine eksperdina geotehnika projektis

Arendustöö ühe olulise osana oli osaleda geoünteetika kui polümeerse materjali eksperdina Tellijal poolt tellitud teises paralleelses arendustöös „Muldkeha projekteerimine (sh arvutused) ja tüüplahenduste väljatöötamine“ mida juhtis IPT Projekti juhtimine OÜ. Osapooled andsid olulised sisendid teise poole projektidesse, osaleti aruteludes ja ettepanekute koostamises geosünteetika kasutamisel teede ehituses sõltuvalt geosünteetide lähtematerjalidest ja selle mõjudest geosünteedi käitumisele konstruktsioonis ning IPT koostatud juhendmaterjali „Juhend geosünteetide kasutamiseks tee konstruktsioonis“ geosünteetide omadusi käsitleva osa täiendamises. Eksperdina töötati läbi ja anti hinnanguid ISO TC 221 ja CEN TC 189 tööriühmades arendatavate geosünteetide katsestandardite osas.

5. Objektidel geosünteetide proovide võtmine ja tööde teostamiseks võrdluskatsete tegemine

Lepingu täitmise alguses tegeleti geosünteetide proovide kogumisega nii ehitusobjektidelt kui ka otse tootjatelt ning teostati standardijärgsed katsekehade ettevalmistamise ning Lepingus ettenähtud, temperatuuri mõju hindamise ning roomekatsetuste võrdluskatseks vajalike tõmbekatsete teostamisega tavaoludes. Objektilt (ja ka katsetamiseks otse tootjalt või edasimüüjalt) proovide võtmiseks tuleb järgida kindlaid nõudeid. Katsekehasid lõigates tuleb lähtuda konkreetsetelt selle katse jaoks kehtivatest standarditest, mille jaoks katsekehasid ette valmistatakse. Selliste katsete tegemisel, mille puhul katsekehade mõõtmed on eriti olulised, võib katsekehad lõigata suurematena ning pärast konditsioneerimist täpsesse mõõtu lõigata või töödelda.

Proovide võtmisel tuleb esmalt identifitseerida toode vastavalt EVS EN ISO 10320 standardile. Kui proovide võtmisel ei järgne kohe katsekehade ettevalmistamine, tuleb proovide identiteet säilitada st et toodet peab olema võimalik identifitseerida vahetult enne katse sooritamist ka siis kui ta ei ole enam originaalpakendist. Proovil olevad asjakohased identifitseerimismärgised tuleb üle kanda kõigile katsekehadele, et oleks tagatud nende õige identifitseerimine. Üldpõhimõtted proovide võtmise kohta ehitusplatsile tarnitavatest geosünteetidest ning proovidest võetud katsekehade ettevalmistamise kohta on sätestatud standardis EVS-EN ISO 9862. Lisaks proovivõtmise protokollile tuleb ka proovidele märkide masinasuund, rulli sisemine pool, tootja ja toote identiteet, rulli number, proovi võtmise koht ja aeg ning kes proovi võttis.

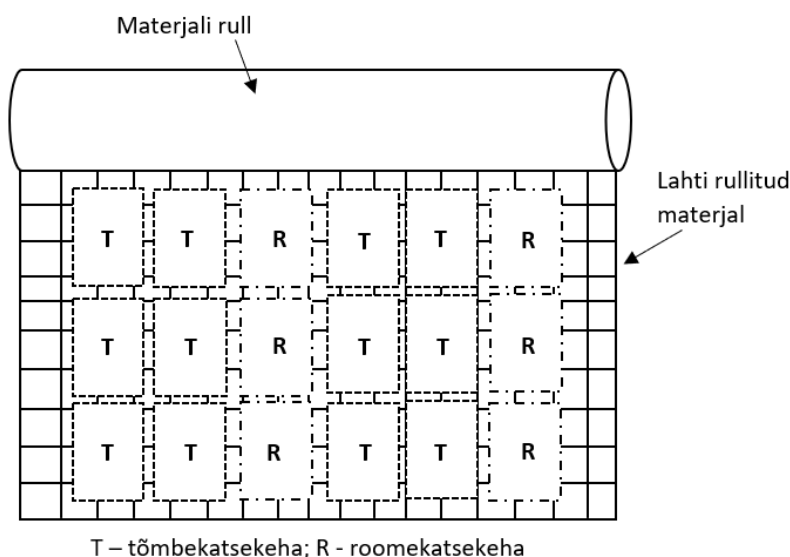
Rullina tarnitavate materjalide korral ei tohi proovitükke võtta rulli kahest esimesest kihist. Rullina tarnitavate toodete korral tuleb kogu rulli laiusest lõigata risti masinasuunda (MD) proov, mille pikkusest peab piisama kõigi vajalike katsekehade võtmiseks. Iga katsemeetodi puhul tuleb nõutav arv katsekehi lõigata ühtlaselt jaotuvatest kohtadest proovi kogu laiuse ja pikkuse ulatuses, ent servale mitte lähemalt kui 100 mm.

Kuivõrd katsekehades ei tohi olla vigastatud kohti, tuleb proovide valimisel sellised kohti vältida või lõigata nii suur tükk, et oleks võimalik võtta vajalik arv kõlblikke katsekehi. Nii proovi võtmise ajal kui ka pärast seda ning proovi hoiustamisel ja transportimisel tuleb hoolitseda selle eest, et proovi füüsiline seisund enne katsetamist ei muutuks. Kui proovi ei lõigata kohe katsekehadeks, peab seda hoidma kuivas, pimedas, tolmuvas ja ümbritseva temperatuuriga kohas, kaitstuna keemiliste ja füüsiliste muutuste eest. Geosünteetiliste proovide hoiustamine ja/või transport tuleb korraldada nii, et see ei mõjutaks negatiivselt

proovide omadusi. Näiteks võib seda teha rullituna, kokkuvoldituna või muul tootja soovitatud viisil.

Vastavalt ISO 13431 standardile võib roomekäitumise uurimisel kasutada kitsamaid katsekehi ehk tehniliselt esindusliku laiusga (TRW) katsekehi, eeldusel et täidetud on tingimus, mille kohaselt vastavalt EVS EN ISO 10319 standardile mõõdetud tõmbetugevused 200 mm laiusel katsekehal ja kitsamal katsekehal ei erine rohkem kui 5% ning deformatsioon maksimaalsel koormusel ei erine rohkem kui 20%. Ainult sel juhul on lubatud kasutada roomekäitumise hindamisel kitsamaid katsekehi. Vastavad arvutused ja näited on ära toodud standardis ISO 13431 7. peatükis. Tabelis 7 on vastavalt ISO 13431 standardile ära toodud katsekehade mõõtmed ja katsetingimused sõltuvalt geosünteedi tüübist.

Vastavalt ISO/TR 20432 standardile, tuleb tõmbe- ja roomeomaduste mõõtmisel kasutada katsekehi, mis on võetud samast materjali partiist. Sellest tulenevalt võetakse katsekehad tõmbe- või roomekatseteks materjali rullist samast pikisuunalisest positsioonist kogu rulli laiusel vaheldumisi mustriks 2 tõmbe-, 1 roomekatsekeha (joonis 6). Katsekehade täpsemad mõõtmed tõmbetugevuse katsetusteks on ära toodud EVS EN ISO 10319 standardis ja roomekatsetusteks tabelis 7.



Joonis 6. Mustriskeem tõmbe- ja roomekatsetusteks vajalike katsekehade lõikamiseks.

Tabel 7 Katsekehade mõõdud ja katsetingimused

Geosünteed	Katsekeha pikkus	Katsekeha laius	Katsetingimused (Haaratsite vaheline kaugus L_0)
Geovõrgud	Vähemalt 2 tõmbeelementi	Vähemalt 3 tõmbeelementi	$L_0 \geq 200$ mm

Proovide võtmisel ja katsekehade ettevalmistamisel ning nende hoidmisel on oluline mõju katsete lõpptulemusele, seega on vaja nii proovivõtjate kui ka katsetajate pädevuse sertifitseerimine. Soovitame kasutusele võtta analoogse dokumendi geotehniliste uuringute ja katsetamise kvaliteedi ja hindamise standardiseeriale ISO/TS 24283 millega analoogselt saab määrata nii kvalifitseeritud proovivõtja ja katsetaja kui ka vastutava eksperdi ning ettevõtte nõuded.

6. Geosüntetika objektilt võetud proovide katsetamine erinevates kliimaoludes ning sellest tulenevate Eestis tehtavate katsete soovitude esitamine

Vastavalt geosüntetika tootestandarditele vastutavad tootjad nende toodete omaduste eest mida nad toimivusdeklaratsioonis deklareerivad. Tootjad ei ole kohustatud (ega ei saa) toote omadusena toimivusdeklaratsioonis deklareerida täiendavaid omadusi, sh geosünteedi vastupidavust erinevatele temperatuurile. Tootel peab olema teave, et ennustatav kestvus vastavalt kuni 5 aastat st ajutine, 25, 50 või 100 aastat looduslikes pinnastes, kus $4 \leq \text{pH} \leq 9$ ja pinnase temperatuur on $\leq 25^\circ\text{C}$ katsetamistulemuste põhjal vastavale geosünteedile kohanduval meetodil. Toote omadused deklareeritakse kehtivana temperatuuril $\leq 25^\circ\text{C}$ ja geosüntetika tootestandardite lisades D on kirjas, et vastava standardi järgmises versioonis kavandatakse lisada vastupidavuse hindamine madalatel temperatuuridel. Eesti paikneb piirkonnas, kus temperatuur võib varieeruda talvisest -30°C kuni suviste $+30^\circ\text{C}$, seega kõigub temperatuur ka pinnases aasta lõikes. Kuni umbes ühe meetri sügavuseni avaldab õhutemperatuur suurt mõju, mistõttu talvisel perioodil miinuskraadidega esineb pinnase läbikülmumist ja suvisel perioodil võib eriti asfaltkattega pinnase temperatuur tõusta õhutemperatuurist kõrgemale. Mida sügavamale pinnases liikuda, seda vähem avaldab õhutemperatuur mõju, kuid aasta lõikes temperatuur siiski kõigub sõltuvalt sügavusest umbes $10\text{--}15^\circ\text{C}$ ulatuses. Sügavamal kui 10 m on temperatuur aasta lõikes konstantne jäädes vahemikku $8\text{--}10^\circ\text{C}$.

Seega pinnakihtidele lähemale paigaldatavate ja tugevdamise eesmärgil kasutatavate geosünteedide puhul on oluline arvestada temperatuuri mõjuga. Selle välja selgitamiseks on välja töötatud temperatuuri mõju hindamise protseduur, mis on ära toodud Lisas 2.



Joonis 7. Temperatuuri kontrolli kamber tõmbemasinal Instron 5866, kus (vasakul) kamber suletud uksega ning (paremal) avatud uksega kamber, kus sees on haaratsid.

Metoodika rakendamiseks projekteeriti olemasolevale tõmbetugevuse seadmele temperatuuri kontrolli kamber (Joonis 7), mis võimaldab katsetusi läbi viia temperatuurivahemikus -10°C kuni 60°C ning hinnata tugevdamiseks kasutatavate geosünteedide tõmbetugevust nii elastses

kui ka viskoelastes piirkonnas. Temperatuuri mõju hindamise viidi läbi Eesti teedehituses enamlevinud polümeersete geosünteedide PET, PP ja HDPE geovõrkudega (tabel 8). Katsetustest järeldus, et kõigi testitud geovõrkude tõmbetugevus paranes madalatel temperatuuridel, kuid vähenes ka purunemisdeformatsioon ehk materjal muutus hapramaks. Kõrgematel temperatuuridel vastupidi materjali tõmbeomadused halvenesid ning purunemisdeformatsioon suurenes ehk materjal muutus elastsemaks.

Tabel 8. Eestis enam levinud geosünteedide klaasisiirdetemperatuurid sõltuvalt nende polümeersest olemust

Polümeer	Klaasisiirdetemperatuur T_g
HDPE	-120 °C
PP	-10 °C
PET	75 °C

Katsetuste tulemustes järeldub, et HDPE puhul alates 40 °C-st tõmbetugevus vähenes 20% võrreldes tootja deklareeritud indeksomadustega ning -10 °C jääb purunemisdeformatsioon juures tootja deklareeritud väärtuse piirist 1% võrra allapoole mistõttu tuleks paigaldamisel 0-1 m sügavusele pinnakihi rakendada vähendavat tegurit. Tegurite väljatöötamine eeldab koostööd tee konstruktsiooni valdkonna ekspertidega.

Katsetest järeldub, et oluline on jälgida projekteerimisel, et teede konstruktsioonis kuni ühe meetri sügavusele, kus on temperatuuri gradient kõige suurem, paigaldatava geosünteedi puhul jääks materjali tõmbeomadused suvistel kõrgematel temperatuuridel ning purunemisdeformatsioon madalatel talvistel temperatuuridel materjali ja paigaldiste disainis ette nähtud piiresse. See on eriti oluline just tugevdamise funktsiooni täitvate geosünteedide korral, sest selle funktsiooni täitmine konstruktsioonis on temperatuurist kõige enam mõjutatud.

Kõigi teedehituses kasutatavate uute paigaldise tugevdamiseks kasutatavate geosünteedide, nii keemilise koostise kui ka struktuuri poolest, puhul tuleks vähemalt ühel korral läbi viia temperatuuri mõju katsetused. Katsetuste alusel saab koostada heakskiidetud teadaolevate teguritega toodete nimekirja, millesse saab vajadusel analoogseid tooteid (sarnane materjali keemiline koostis ja struktuur) lisada või siis lisada uusi tooteid peale analoogsete katsetuste läbiviimist.

On oluline märkida, et kui paigaldises kasutatav geosüntee erineb oma polümeerse olemuse poolest Eesti teedehituses enamlevinud HDPE, PP ja PET põhistest geosünteedidest, näiteks on valmistatud polüamiidist, aramiidist või polüvinüülalkoholist, siis on oluline uurida materjali temperatuurisõltuvust vastavalt Lisas 2 ära toodud temperatuuri mõju hindamise protseduurile sõltumata sellest, millisele sügavusele geosüntee konstruktsioonis paigaldatakse.

7. Roomekatsete teostamine ja meetoodikate väljatöötamine

7.1 Katsete ettevalmistamine ja teostamine

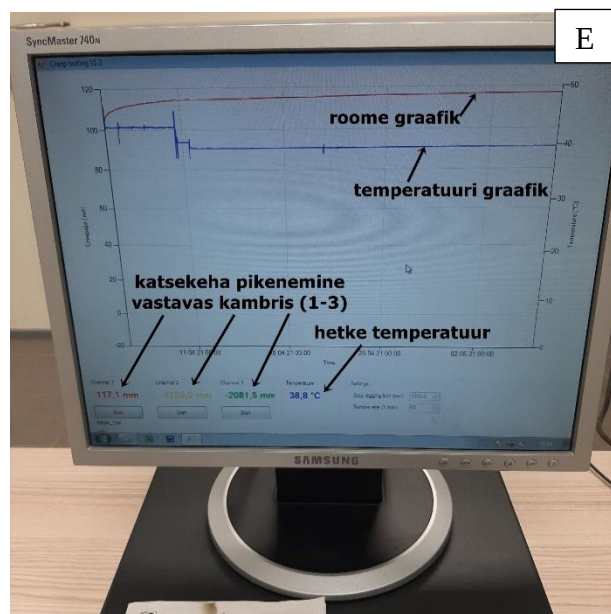
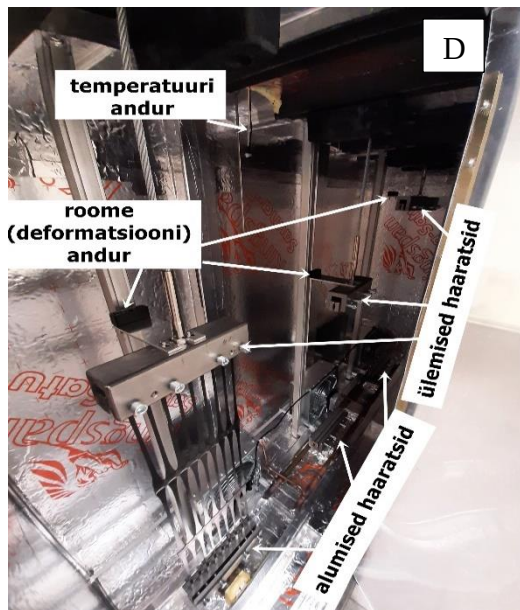
Arendustöö peamiseks eesmärgiks oli geosünteedide pikaajalise mehaanilise ja keemilise vastupidavuse meetoodikate arendamine, kuna objektilt võetud geosünteedika proovide pikaajalise vastupidavuse katsetamine on väga aeganõudev. Tootja on küll kohustatud tegema tootestandardi järgi kestvuse katsed ja tulemused deklareerima, kuid info toote toimivusdeklaratsioonil ei ole aluseks arvutustes vajalike vähendamise tegurite määramiseks. Geosünteedika tootestandardite lisad B Durability sätestavad, et nendes olevad katsed ei ole aluseks vähendamise tegurite määramiseks. Arendustöö raames töötati välja erinevad kiirendatud vanandamise protseduurid, mille aluseks olid katsed erinevates keemilistes keskkondades, katsed erinevatel temperatuuridel ja roomekatsed nii erinevatel temperatuuridel ja koormustel kui ka kombineerituna erinevates keemilistes keskkondades.

Roomekatsete tegemiseks koostati pärast teoreetilist analüüsi esialgsed kiirendatud vastupidavuse meetoodikaid mis sobivad Eesti oludele ja arvestavad Eesti teedehituse eripärasid. Roomekäitumise uuringuteks projekteeriti ja valmistati unikaalsed roomekatse seadmed, mis võimaldavad rakendada erinevate geosünteedide katsetamiseks vajalikku koormust, teha seda laias temperatuurivahemikus 10°C kuni 60°C-ni, täpselt mõõta ja registreerida katsekeha roomekäitumist kuni kolmel katsekehal samaaegselt (Joonis 9).

Katseseadmete konstrueerimiseks saadi abi geosünteede valmistava ettevõtte Tensar Ltd (Inglismaa) katselabori töötajatelt. Töövõtjal õnnestus sel eesmärgil teha teine visiit Tensar Ltd laborisse ning ka tutvuda geosvõrkude tootmisega Inglismaal

Järgnevalt toimus roomekatsetusteks vajalike geosünteedide ja materjalide hankimine, lisaks väljatöötatud meetoodikate rakendamiseks vajaliku katseaparatuuri hankimine ja paigaldamine. Konstrueeriti esmalt esimene roomekatse seade (joonis 8) ning sellest saadud kogemuste põhjal modifitseeritud roomekatse seade koos keemilise vanandamise kambritega (joonis 9).





Joonis 8. Pildil (A) on näha roomekatse rakist, mis koosneb kolmest omavahel ühendatud kambrist, kuhu on võimalik kuni kolm katsekeha haaratsite vahele paigutada; (B) teisel pool kambreid on katsekeha koormamissüsteem, millel on nelja kordne võimendustegur ehk katsekehadele rakendub nelja kordne koormus; (C) on näha kuidas ühes kambris on katsekeha haaratsite vahele paigutatud; (D) on näha kus asub temperatuuri andur ning kuidas kolm kambrit on omavahel ühendatud ning igaühes on haaratsid ning nende juurde kuuluvad roome



Joonis 9. Roomekatse seade, mis koosneb kolmest omavahel ühendatud kambrist, kuhu on paigaldatud kolm eraldi asetsevat vedelikukambrit millesse on võimalik igaühte paigaldada katsekeha haaratsite vahele.

Katsete läbiviimiseks koostati erialgsed meetodikad, millede järgi toimusid vajalikud geosünteedide katsetused, erinevates keemilistes keskkondades, katsed erinevatel temperatuuridel roomekäitumise katsetamine ja roomekatsed kombineeritud keemilise vanandamisega. Nende katsete analüüsi ja täiendava teadusinfo läbitöötamise baasil toimus

metoodikate arendamine ning lõplike metoodikate valmimine. Töö toimus koostöös juhtiva geosünteeite arendava ja tootva ettevõttega Tensar Ltd.

Kiirendatud keemilise vanandamise metoodika väljatöötamise raames selgitati koostöös IPT Projektijuhtimise ekspertidega, et Eesti oludes teedeehituse keskkonnas olulisimat keemilist riski omavad rabavesi, teehoolduskemikaal NaCl ning põlevkivi tuhk. Eeltoodust osutus üheks suurimaks keemiliseks riskiallikaks põlevkivi tuhk, mis on üks taaskasutatavatest (ringlusse võetavatest) materjalidest, mida kasutatakse Eesti teekonstruktsioonides peamiselt hüdraulilise sideainena või nende koosseisus.

Töövõtja poolt varasemalt läbi viidud uuringust „Geosünteeite kiirendatud keemilise vastupidavuse katsed Eesti teedeehitusel esinevates keskkondades“ järeldus, et PET geosünteedid on põlevkivi tuha suhtes väga tundlikud. Sellest järeldub (ja saadi kinnitus aluselise keskkonna tugevale mõjule Eestis kasutusel olevatele PET geosünteedidele), et põlevkivi tuha olemasolul paigalduskeskkonnas tuleb kindlasti vältida PET põhiste geosünteeite kasutamist ning kasutada näiteks PP või HDPE põhiseid geosünteeite, sest läbiviidud uuringus ei avaldanud põlevkivi tuhk neile materjalidele märgatavat mõju. Kõigi teedeehituses kasutatavate keemilise koostise kui ka struktuuri poolest uute materjalide puhul tuleks enne nende kasutusel võtmist läbi viia keemilise vanandamise katsetused hindamaks põlevkivi tuha mõju.

Selgitamaks kas roomekäitumise hindamiseks väljatöötatud metoodika toimib ja kuidas konstrueeritud roomekatseseadmed toimivad valideeriti Taltechi roomekatsesedmed koostöös Tensar Ltd töötajatega nende toote Tensar RE 520 60 UTS põhjal võrreldes katsete tulemusi samast rullist võetud katsete andmetega, mida tootja teostas oma laboris. Analoogselt valideeriti keemilise vanandamise vedelikukambritega roomekatseseadmed Taltechis.

7.2 Roomekäitumise katsetamine ja roomekatsed kombineeritud keemilise vanandamisega

Roomekatsed teostati vastavalt väljatöötatud katseplaanile. Ühes kambrite kompleksis teostati pikaajaline HDPE (TENSAR RE 520) 10 000 tunnine roomekatse 10, 20, 30 UTS (UTS = ultimate tensile strength) temperatuuril +20°C hindamaks roomekatsete pikaajalist mõju ning valideerimaks roomekatsete metoodikaid, teises nii HDPE kui PP lühemajalised üle 100 tunnised katsed samades oludes kui esimestes kambrites kontrollkeskkonnas +20°C ja +60°C kiirendatud vanandamise katsena kui ka erinevates keemilistes keskkondades valideerimaks roomekatsete metoodikaid.

Tellija poolt väljaspool antud lepingut tellitud uuringu „Geosünteeite kiirendatud keemilise vastupidavuse katsed Eesti teedeehitusel esinevates keskkondades“ katsetulemusi võeti arvesse vastava metoodika täiendamisel ning 2022-2023 teostati nii roomekatsed, roomekatsed tavaoludes +20°C kui +60°C juures kui võrdlevalt roomekatsed kombineeritud keemilise vanandamisega. Kombineeritud katsemetoodika eesmärk on võimaldada hinnata vanandamise läbi geosünteedi roomet erinevates keemilistes keskkondades ning seeläbi geosünteeite pikaajalist vastupidavust objektiivsemalt hinnata arvestades Eesti teedeehituses esinevaid keemilisi keskkondasid ning seega jälgendada tegelikke pikaajalisi mõjutusi terviklikult. Tööde tulemusel valmisid valideeritud protseduurid kiirendatud geovõrkude roomekäitumise ja kiirendatud geovõrkude roomekäitumise kombineerituna keemilise vanandamisega (Lisad 3 ja 4)

Roomekatsete kombineerimiseks keemilise vanandamisega temperatuuridel +20°C ja +60°C teostati HDPE ja PP geovõrkudega elektritootmise tuha leostusvees (aluseline keskkond) ja rabavees (happeline keskkond). Aluselise keskkonna jaoks kasutati Auverest CFB tuha 10% leostusvett. Happelise keskkonna jaoks toodi Harjumaa rabadest rabavett, mille pH-d ühtlustati analoogseks eelnevat Tellija poolt eraldi finantseeritud keemiakatsetes kasutatud lahusega. Keemilise vanandamisega kombineeritud katsed teostati teisel roomekatseseadmel vastavalt katseplaanile kuni 2023 aasta novembri lõpuni. Pärast teise katseaseadme valideerimist teostati võrdlevad kombineeritud katseid +20°C ja +60°C temperatuuridel kuivas ehk kontrollkeskkonnas ning aluselises ja happelises keskkonnas kokku 12 erinevat katseseeriat 2-3 katset igas seerias paralleelselt kolme erineva koormusskeemiga (vastavalt 10 UTS, 20 UTS ja 30 UTS, UTS = ultimate tensile strenght) kokku 102 katset.

Esmalt teostati kaks katseseeriat PP ja HDPE geovõrkudega koormusskeemil 10 UTS, 20 UTS, 30 UTS kontrollkeskkonnas +20°C ja +60°C.

Järgnevalt teostati kaks kuni kolm katseseeriat PP ja HDPE geovõrkudega koormusskeemil 10 UTS, 20 UTS, 30 UTS happelises (rabavees pH 3,7-3,8) ja aluselises (tuhavees pH ~12,3) keskkonnas +20°C ja +60°C.

Hindamaks metoodika õigsust ja täpsust võrreldi kõikide katsete 1 tunni, 24 tunni ja 100 tunni andmeid. Esmalt võrreldi erinevatest keskkondades tehtud katsete tulemusi omavahel koormusskeemi kaupa, järgnevalt võrreldi kontrollkeskkonna andmeid aluselise ja happelise keskkonna tulemustega. Kuigi oleks võinud eeldada, et varieeruvus kasvab koormuse ja aja suurenemisel, ei olnud see alati nii. Erinevus kontrollkeskkonnaga oli ühtlasem +20°C, aja möödudes erinevus kasvas ühes suunas. +60°C puhul erinevused oluliselt ei kasvanud, kuid olid mõlemas suunas. Nii kontrollkeskkonnas kui aluselises ja happelises keskkonnas oli katsete tulemuste varieeruvus väike, st tulemused olid keskmise lähedased.

Standardhälve kontrollkeskkonna ning aluselise ja happelise keskkonna katsete 1 tunni, 24 tunni ja 100 tunni andmete koondvõrdlemisel saadi:

PP +20°C minimaalselt 0,05 maksimaalselt 0,32

PP +60°C minimaalselt 0,25 maksimaalselt 1,02

HDPE +20°C minimaalselt 1,05 maksimaalselt 2,31

HDPE +60°C minimaalselt 1,42 maksimaalselt 5,32

Katsetulemuste detailne analüüs on tabelites HDPE ja PP katsetuste kohta, LISA 5.

Kokkuvõtlikult saab antud katsetest saadud andmete alusel väita, et need kinnitasid katsemetoodikate sobivust.

Kuna vastavalt geosüntetikate tootestandardite lisadele B „Kestvus“ ei saa lugeda eeldatavat eluiga tootjapoolseks garantiiks vastavale elueale vaid seda tuleb käsitleda kui vahendit sobiva toote valikuks oodatavaks elueaks. Seni ei ole tootjad kestvuse all alati roomet deklareerinud, kuigi standard seda ette näeb, viidates, et seda tuleb teha vastavalt lisa B asjakohasele jaotisele. Suuremad tootjad on hakanud viimasel ajal seda ka deklareerima, kuid nagu eelpool viidatud, selle eest ei võeta vastutust (kuigi see on vastuolus määrusega) Kui aga tootja poolt on sertifitseeritud roomepurunemise näitajad teatud tugevdamisskeemides, siis hinnates nende sobivust käsitluse all olevale tugevdamisele, võib neid näitajaid kasutada.

Näiteks BBA on sertifitseerinud mitmeid tooterühmi nagu Huesker Fortrac (HAPAS certificate 13/H197) ja Tensar R ja RE HAPAS sertifikaadiga 13/H201. Tencate Miragrid ja Naue Secugrid toodete deklaratsioonidel on toodud tootja poolt lubatud pikaajalised tõmbe ehk siis roomepurunemise näitajad.

Antud uuringus katsetati Tensar RE520 mille sertifikaadi järgi on tõmbetugevus T_{ult} MD 52,8 kN/m, deklaratsioonitud tõmbetugevuse tagatud väärtus 57,0 hälve -4,2 TCR (TCR on pikaajalise roome purunemistugevus ettenähtud elueal) 27,3 kN/m ettenähtud projekteeritud elueal 120 aastat.

Geovõrkude projekteeritud tugevust T_D saab arvutada näiteks:

- kandepiiriseisundi (ULS) jaoks: $T_{D(ULS)} = T_{CR} / (f_n \times f_m)$

- kasutuspiiriseisundi (SLS) jaoks: $T_{D(SLS)} = T_{CS} / f_m$

kus:

T_{CR} on pikaajalise roome purunemistugevus ettenähtud elueal ja temperatuuril

T_{CS} on maksimaalne lubatud tõmbekoormus, mis tagab ettenähtud ehitusjärgse piirava deformatsiooni kindlaksmääramise et SLS-i ei saaks ületatud

f_n on tõrke osategur vastavalt standardile BS 8006-1 : 2010, tabel 9

f_m on materjali ohutustegur, mis võimaldab vähendada paigalduskahjustuste ja ilmastikumõjude tugevust (sealhulgas kokkupuude päikesevalgusega), keemilised ja muud keskkonnamõjud ning võimaldada nende ekstrapoleerimist eespool nimetatud vähendustegurite kindlaksmääramiseks kasutatud andmed.

Geovõrgu pikaajaline roomepurunemise tugevus tugevdamisel (T_{CR}) arvutatakse järgmise valemi abil: $T_{CR} = T_{char} / RF_{CR}$, kus T_{char} on iseloomulik lühiajaline tugevus ja RF_{CR} on vähendusfaktor, mis arvestab pikaajalise staatilise koormuse mõjuga kavandatud kasutustemperatuuril.

Geosüntetidest tee projekteerimisel saab lähemalt lugeda Transpordiameti kodulehel olevast uuringu „Muldkoha projekteerimine (sh. arvutused) ja tüüplahenduste väljatöötamine (sh. geosüntetik kvaliteedikontrolli arendamine)“ lisast 3 „Geosüntetid kasutamine tee konstruktsioonis“.

7.3 Metoodika väljatöötamine geosüntetid pikaajalise vastupidavuse kiirendatud hindamiseks Eestis

Geosüntete kasutatakse geotehnilistes konstruktsioonides, millede projekteerimisel tuleb Euroopas lähtuda Eurokoodeksist, mille uueendatud versioon eeldatavalt jõustatakse lähiaastail, millest tulenevad ka projekteerimisel geosüntetikat kasutades aluspõhimõtted.

Pinnasekonstruktsioonide projekteerimisel tuleb arvestada konstruktsiooni tugevusomaduste püsivust maksimaalse deformatsiooni ja minimaalse purunemiseni viiva tugevusega kavandatud kasutusea (design lifetime) jooksul.

Vastavalt standardile EVS-EN 1997-1, lähtutakse projekteerimisel piiriseisunditest.

Eristatakse kasutus- ja kandepiiriseisundit. (serviceability limit state, SLS) ja (ultimate limit state, ULS) Kasutuspiiriseisund on seisund, mille ületamisel konstruktsioon või selle osa ei ole enam suuteline täitma sellele esitatud eksploatatsiooni nõudeid. Kandepiiriseisund on seisund, mille ületamisega kaasnevad konstruktsiooni kahjustused või purunemine. Mõlemad omadused sõltuvad ajast ja võivad keskkonna mõjul halveneda.

Ehituskonstruktsioonide kavandatud kasutusiga, (tuleneb EN 1990) tüüpiliselt 50 – 100 aastat on liiga pikk aeg vahetute mõõtmiste läbiviimiseks. Seetõttu kasutatakse geosüntetikaga tugevdamise arvutustes vähendusfaktoreid, mis leitakse lühiajaliste katsetuste tulemuste ekstrapoleerimise kaudu. Roome- või degradatsiooniprotsessi kiirendamiseks võib vajaduse korral katsed läbi viia kõrgendatud temperatuuril.

Teoreetilise analüüsi baasil koostati esmased kiirendatud roome (lisa 3), temperatuuri (lisa 2) ja keemilise (lisa 1) vanandamise meetodikad. Kiirendatud keemiliseks vanandamise meetodika väljatöötamiseks selgitati esmalt välja Eesti teekonstruktsioonides esinevad keemiliste riskide allikad, koguti vastavad näidised ning töötati välja mudelkeskkonnad ning kiirendatud keemilise vanandamise protseduur (Lisa 1). Selle alusel tellis Tellija väljaspool antud lepingut uuringu „Geosünteedide kiirendatud keemilise vastupidavuse katsed Eesti teedehitusel esinevates keskkondades“, millest saadud katsetulemuste hindamisel leiti, et vastavat meetodikat täiendada ning kavandati ka protseduur kus roomekatseid kombineeriti keemilise vanandamisega. See võimaldaks vanandamise mõju ning seeläbi geosünteedide pikaajalist vastupidavust objektiivsemalt hinnata arvestades Eesti teedehituses esinevaid keemilisi keskkondasid ning seega jälgendada tegelikke pikaajalisi mõjutusi terviklikult. Selleks koostati esmane protseduur geovõrkude roomekäitumise hindamiseks kombineerituna keemilise vanandamisega, konstrueeriti roomekatseseade, millele lisati vedelikukambrid kombineeritud keemilise vanandamise katsete läbiviimiseks. Esialgsete meetodikate alusel viidi läbi katsetused, millest saadud kogemuste põhjal täiendati meetodikaid ja lõpptulemusena on välja on töötatud järgnevad meetodikad:

LISA 1 Geosünteedide kiirendatud keemilise vanandamise protseduur

LISA 2 Protseuur temperatuuri mõju hindamiseks geovõrkude tõmbeomadustele

LISA 3 Geovõrkude kiirendatud roomekäitumise hindamise protseduur

LISA 4 Protseuur geosünteedide roomekäitumise hindamiseks kombineerituna keemilise vanandamisega

8. Järeldused

8.1 Kokkuvõtte töö tulemustest ja koostatud järeldused

- Eesti tee ehitusobjektidel kasutatav enamlevinud geosünteedide polümeersed lähtematerjalid on polüetüleentereftalaat (PET, kuulub polüestrite rühma), polüpropüleen (PP) ja polüetüleen (PE või HDPE).

Polüestrid ja aramiid on tundlik leeliselise keskkonna suhtes - seega ei või neid kasutada kokkupuutes põlevkivituhaga, tsemendi või lubjakiviga kui keskkonna pH on üle 12. Töö raames tehtud katsete tulemused kinnitavad, et PET põhised geosünteedid ei sobi kasutamiseks põlevkivituhaga, eriti värske põlevkivituhaga leostusveega kokkupuutel. Kui kasutuskeskkonna pH on vahemikus 9-11, siis erandkorras võib seda teha peale tootespetsiifiliste uuringute läbiviimist.

- Kõiki turul olevaid eeltoodust erinevaid geosünteedika materjalide liike ja uusi materjale tuleb hinnata Eestile iseloomulike keemiliste riskide seisukohalt. Vastav meetodika on välja töötatud.
- Geosünteedide kui viskoelastsete polümeeride mehaanilised omadused sõltuvad oluliselt temperatuurist ning seega sõltub geosünteedi paigalduse asukohast ja sügavusest. Sügavuse kasvades temperatuuri aastaringne kõikumine väheneb ning stabiliseerub viimaks vahemikus 8-10°C. Kõige kriitilisem on temperatuuri kõikumiste mõju paigaldusel kuni 1 m sügavuseni.

Geosünteedi klaasisiirdetemperatuur on temperatuur, millest madalamal temperatuuril on materjal tugev kuid habras, kõrgemal temperatuuril deformeeritavam, kuid tugevus väheneb temperatuuri kasvuga. PP ja PE/HDPE on Eestis tavapäraselt esinevate välistemperatuuride puhul peamiselt kummiolekus ja PET klaasiolekus.

Minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul tuleb arvestada kõrgeima kasutustemperatuuriga ja maksimaalse purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga, mida tuleb arvestada tee konstruktsiooni projekteerimisel teostatavates arvutustes. **Kui ehitaja soovib kasutada erineva koostisega polümeeri kui, see millel põhinevad projekti arvutused, siis tuleb erineva/uue materjaliga teostada uued arvutused.**

- Geosünteedile mõjuv temperatuur sõltub paigalduse asukohast ja sügavusest. Sügavuse kasvades temperatuuri aastaringne kõikumine väheneb ning stabiliseerub viimaks vahemikus 8-10°C. Kõige kriitilisem on temperatuuri kõikumiste mõju paigaldusel kuni 1 m sügavuseni. Polüolefiinid on meil tavapäraselt esinevate välistemperatuuride puhul peamiselt kummiolekus kuna PP klaasisiirdetemperatuur jääb erinevate autorite andmetel vahemikku -10 kuni -20°C ja PE klaasisiirdetemperatuur vahemikku -80 kuni -90°C. Polüestrid, PET on aga valdavalt klaasiolekus, kuna selle materjali klaasisiirdetemperatuur jääb vahemikku +65 kuni +80°C. Kummiolekus materjalide tõmbe- ja roomeformatsiooni võime on üldiselt suurem, kuid purunemispinge väiksem kui klaasiolekus materjalidel. Eeltoodut tuleb arvestada projekteerimisel.

Enamlevinud geosünteed, PP võib olla Eesti kliimaoludes roome suhtes tundlik valdava osa aastast, erandiks on talvised temperatuurid allpool -10°C. Probleem suureneb suvise kuumuse tingimustes. Samas on kummiolek paigalduse suhtes soodus, kuna materjal ei käitu siis painutamisel hapralt.

Teiseks levinud geosünteed PET on kogu Eesti kasutustemperatuuride vahemikus klaasiolekus. Seetõttu on selle materjali roomekindlus suurem. Valdavalt kiulise struktuuri korral ei ole klaasiolek painduvuse mõttes probleemiks ja PET sobib kasutamiseks laias temperatuurivahemikus. PET roomet takistab ka makromolekulide suhteline jäikus ja suure benseenituumaa esinemine peaahele. Üldiselt võib öelda, et PET omadused on Eesti kasutustingimustes vähem temperatuurist sõltuvad kui PP omadused. Kuigi määrad on erinevad, kasvab pikaajaline roome nii PP kui PET puhul temperatuuri suurenedes. Seega on oluline materjalide katsetuses läbi viia lühiajalised roome katsed 20°C ja kõrgematel temperatuuridel ja kasutada aja-temperatuuri superpositsiooni printsiipi ennustamiseks materjali pikaajalist roomet temperatuuridel kuni materjali maksimaalsete suviste temperatuurideni paigaldistes. Tuleb tagada, et roome ei ületaks materjali kasuliku eluea jooksul ette nähtud maksimaalse deformatsiooni ulatust või ei viiks materjali purunemiseni. 20°C ja madalamatel temperatuuridel ja eriti külmumistemperatuuridel on pikaajalise roome mõju ilmselt väike.

- Kuigi HDPE, PP ja PET on enamlevinud geosünteedide materjalid ja seetõttu ka antud uuringu põhifookuses, tuleb uuringu järeldusi laiendada ka teistele geosünteedide materjalidele, millel esineb samuti füüsikaliste omaduste temperatuurisõltuvus: polüamiid ja aramiid (mille käitumine on pigem sarnane PET-ga), PVC ja teised.
- Geosünteedide purunemispinge temperatuuri alanemisel kasvab ja seega ei ole tugevus madalamatel temperatuuridel disainiliseks probleemiks. Probleemiks võib aga olla

purunemisdeformatsioon, mida ei tohi materjalide kasutamisel madalatel temperatuuridel ületada. Seega tuleks minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul arvestada kõrgeima kasutustemperatuuriga ja purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga. Eeltoodut tuleb arvestada projekteerimisel.

- Eesti teedehituse keskkonnad, mis geosüntete keemiliselt oluliselt mõjutavad on: elektritootmise värske tuha leostusvesi (tugevalt aluseline keskkond); elektritootmise stabiliseeritud tuha leostusvesi (aluseline keskkond); rabavesi (happeline keskkond). Soovitatav on üldjuhul kasutada PE ja PP põhinevaid geosüntete, mis on riski suhtes vähem tundlikumad võrreldes PET geosüntediga, mis on eriti tundlik eriti aluselistes keskkondades suhtes. Kasutades PET või teistel polümeeridel põhinevaid geosüntete tugevalt aluselistes või happelises keskkonnas tuleb neid eelnevalt katsetada.
- Geosüntetidega projekteerimist ja vastupidavust käsitlevad normdokumendid [ISO/DTR 18228-1] ja [ISO/TR 20432] ei käsitle üldiselt madalaid temperatuure. [ISO/TR 20432] sätestab, et antud dokument ei kajasta muutusi mehhaanilistes omadustes 0°C madalamatel temperatuuridel ja külmunud pinnases. Ka on seal märgitud, et kui puudub etteantud materjali kasutamise pinnase temperatuur, siis tuleb selleks arvestada temperatuuri, mis jääb aasta keskmise temperatuuri ja kõige soojema kuu päevase temperatuuri vahemiku keskosasse. Kui ka seda pole võimalik määrata, tuleb temperatuuriks arvestada 20°C. Samas käsitlevad nimetatud dokumendid üldist kokkuleppelist arvamust praeguste teadmiste baasil ja soovitude puudumine külmumispunktist madalamal temperatuuril toimuvate protsesside viitab puudulikule katseliselt tõestatud informatsioonile. Seega ei või järeldada, et madalal temperatuuril toimuvad nähtused oleksid ebaolulised.

Geosüntete purunemispinge temperatuuri alanemisel kasvab ja seega ei ole tugevus madalatel temperatuuridel probleemiks. Probleemiks võib aga olla purunemisdeformatsioon, mida ei tohi materjalide kasutamisel madalatel temperatuuridel ületada. Seega tuleks minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul arvestada kõrgeima kasutustemperatuuriga ja purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga.

Geosüntete kui polümeeride mehaanilised omadused sõltuvad oluliselt temperatuurist ja olulisem temperatuuripiirkond, mille juures toimuvad järsud muudatused on klaasisiirdetemperatuur.

Polüolefiinid on meil tavapäraselt esinevate välistemperatuuride puhul peamiselt kummiolekus kuna PP klaasisiirdetemperatuur jääb erinevate autorite andmetel vahemikku -10 kuni -20°C ja PE klaasisiirdetemperatuur vahemikku -80 kuni -90°C. Polüestrid, PET on aga valdavalt klaasiolekus, kuna selle materjali klaasisiirdetemperatuur jääb vahemikku +65 kuni +80°C. Kummiolekus materjalide tõmbe- ja roomedeformatsiooni võime on üldiselt suurem, kuid purunemispinge väiksem kui klaasiolekus materjalidel.

8.2 Arendusettepanekud

- Kuna füüsikaliste ja keemiliste mõjutuste osas on kõige vastuvõtlikumad tugevdavad geosüntedid, siis Töö teostaja ettepanek on, et käesoleva arendustöö tulemusel

koostatavate meetodikatega hinnata esmajärjekorras enamlevinud polümeeridel, nagu PP, PE ja PET põhinevaid tugevdavaid geosünteeete mida kavatakse kasutada oluliste konstruktsioonide tugevdamisel (armeerimisel geosünteedidega). Samuti tuleb meetodikaid rakendada katsetustena uutele, turule sisenevatele materjalidele ja struktuuridele.

- Kuna läbi viidud uuringud osutavad, et osa materjalide tõmbetugevus ja purunemisdeformatsioon võivad temperatuurist sõltuvalt hälbida tootja poolt esitatud indeksomadustest, on kasutuses olevaid materjale ning turule tulevaid materjale vaja katsetada potentsiaalses paigalduse ja eksploatatsiooni temperatuuride vahemikus, kasutades vaheetapi käigus arendatud meetodikat (Lisa 2). Eriti oluline on see paigalduse korral kuni 1 m sügavuses ja ebaoluline üle 10 m paigaldussügavuse korral. Erinevuse kaudu indeksomadusest saab leida ja rakendada temperatuuri mõjust lähtuvad vähendavad tegurid. Katsetuste alusel saab koostada heakskiidetud teadaolevate teguritega toodete nimekirja, millesse saab vajadusel analoogseid tooteid (sarnane materjal ja struktuur) lisada või siis lisada uusi tooteid peale analoogsete katsetuste läbiviimist.
- Töö tulemused osutavad, et Eestis leiduvad tugevalt aluselised paigalduskeskkonnad omavad potentsiaalset riski teatava koostisega geosünteedidele (polüestrid, aramiid). Töö raames katsetatud PET põhised materjalid ei sobi kasutamiseks põlevkivituhaga, eriti värske põlevkivituha leostusveega kokkupuutes, seega nende kasutamist ilma spetsiaalsete katsetustega ei tohi lubada. Kõiki turul olevaid materjalide liike ja uusi materjale tuleb hinnata Eestile iseloomulike keemiliste riskide seisukohalt. Vastav meetodika on välja töötatud (Lisa 4).
- Eestis tuleb välja arendada tehnoloogiline valmisolek, et töös käsitletud meetodeid rakendada akrediteeritud katselabori tasemel. Üks variant on teostada seda Taltechi biopolümeeride tehnoloogia labori baasil, kuid see eeldab Tellija valmisolekut teadus- ja arendustöö tulemuste rakendamiseks vähemalt juhiste baasil. Sõltumata sellest kes labori loob, on Taltechi biopolümeeride tehnoloogia laboris töös nii katseseadmed kui tehniline valmisolek teostuseks.

9. Summary

The materials and soils in the construction of transport buildings, which have been reinforced with geosynthetics, are subjected to permanent, repeated, or cyclic loads. The load conditions occur in pavements, bases, reinforced subsoils, and the structure surrounding the road, etc. If we do not have sufficient knowledge about the short-, medium- and long-term performance of geosynthetics as polymeric materials and the interaction between them and the soil, then this is an obstacle to their use in permanent structures.

It is not possible to adequately design the corresponding constructions if the Customer foresees the use of standard solutions, where the possibility of using geosynthetics in different functions is not considered, or if it is not known how polymers with different additives from different polymers behave in different environmental conditions. Currently, both semi-empirical and manufacturer-side empirical methods are common for the use of geosynthetics in the design of roads under traffic load. It is very important to know what kind of starting material (polymer) geosynthetics should be used in what form and what additional requirements must be considered both from the environment and from the properties of the surrounding layers when designing a structure (layer) according to the purpose.

The result of the project was recommendations for design projects with geosynthetics reinforcement and developed methodologies for an accelerated assessment of the long-term durability of geosynthetics based on the specific climatic or the chemical conditions of the local environment.

The most important conclusions and recommendations:

- The most common polymeric starting materials for geosynthetics used on Estonian road construction sites are polyethylene terephthalate (PET, belongs to the group of polyesters), polypropylene (PP) and polyethylene (PE or HDPE).
- Polyesters and aramid are sensitive to an alkaline environment - so they cannot be used in contact with oil shale ash, cement, or limestone if the pH of the environment is above 12. The results of the tests carried out within the scope of the work confirm that PET-based geosynthetics are not suitable for use with oil shale ash, especially in contact with fresh oil shale ash leaching water. If the pH of the environment is in the range of 9-11, the use of geosynthetics can exceptionally be provided after conducting product-specific studies.
- All types of geosynthetics materials and new materials on the market that are different from the above must be evaluated from the point of view of chemical risks characteristic of Estonia. The corresponding methodology has been developed.
- The mechanical properties of geosynthetics as viscoelastic polymers depend significantly on temperature and thus depend on the location and depth of geosynthetic installation. As the depth increases, the year-round temperature fluctuation decreases and finally stabilizes in the range of 8-10°C. The most critical is the effect of temperature fluctuations when installing up to a depth of 1 m.
- The glass transition temperature of a geosynthetic is the temperature below which the material is strong but brittle, at a higher temperature it is more deformable, but the strength decreases with increasing temperature. PP and PE/HDPE are mainly in the rubber state and

PET in the glass state at the external temperatures normally occurring in Estonia. In the case of the minimum operational breaking stress, the highest operating temperature must be considered, and in the case of the maximum breaking deformation, the lowest operating temperature, which must be considered when performing calculations in the design of the road structure. If the builder wishes to use a polymer with a different composition than the one on which the design calculations are based, those calculations must be re-performed with the desired polymer.

- The most common geosynthetic, PP, can be sensitive to creep in the Estonian climate for most of the year, except for winter temperatures below -10°C. The problem increases during the summer heat. At the same time, the rubber state is favourable for installation, as the material does not behave fragile when bent. The second most common geosynthetic, PET, is in a glassy state in the entire Estonian operating temperature range. Therefore, the creep resistance of this material is higher. With a predominantly fibrous structure, the glass state is not a problem in terms of flexibility, and PET is suitable for use in a wide temperature range. PET creep is also hindered by the relative stiffness of the macromolecules and the presence of a large benzene nucleus in the main chain. In general, it can be said that the properties of PET are less dependent on temperature than the properties of PP under Estonian conditions of use. Although the rates are different, long-term creep increases with increasing temperature for both PP and PET. When designing, it must be ensured that the expected creep of the geosynthetic does not exceed the range of the maximum deformation foreseen during the useful life of the material or does not lead to the failure of the material.
- The failure stress of geosynthetics increases with decreasing temperature, so strength at low temperatures is not an issue in design. However, the problem can be the breaking strain, which must not be exceeded when using the materials at low temperatures. When designing, the highest service temperature must be considered for the minimum operational breaking stress and the lowest service temperature for the breaking strain.
- Technological readiness must be developed in Estonia to apply the methods discussed in the paper at the level of an accredited test laboratory. One option is to perform it based on the Laboratory of Biopolymers Technology of Taltech, but this requires the Customer's readiness to implement the results of research and development work at least based on the guidelines. Regardless of who creates the laboratory, the Laboratory of Biopolymers Technology of Taltech has both test equipment and technical readiness for implementation.

10. Kasutatud kirjandus

[Allen et al., 1982] - Allen T, Vinson TS, Bell JR, 1982. Tensile strength and creep behavior of geotextiles in cold regions applications. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, NV, 2: 775–780.

[Allen et al., 1983] - Allen T, Bell JR, Vinson TS, 1983. Properties of Geotextiles in Cold Regions Applications. Report 83-6. Transportation Research Institute, Oregon State University, Corvallis.

[Askeland, 1996] Askeland, D. R., (1996). The Science and Engineering of Materials. Third Ed., London, United Kingdom: Chapman & Hall.

[ASTM D4595] – ASTM D4594 – 17 Standard Test Method for Effects of Temperature on Stability of Geotextiles

[ASTM D5262] - ASTM D5262 – 07(2016) Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics

[ASTM D5322] – ASTM D5322 – 17 Standard Practice for Laboratory Immersion Procedures for Evaluating the Chemical Resistance of Geosynthetics to Liquids

[ASTM D6992] - ASTM D6992 – 16 Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method

[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

[Bonthron ja Jonsson, 2017] - Bonthron B., Jonsson C. Temperature controlled tensile tests & Half-scale installation tests at different temperatures. Civilingenjör, Väg- och vattenbyggnad, 2017, Luleå tekniska universitet, Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser

[Bush, 1990] - Bush, D. I., “Variation of Long Term Design Strength of Geosynthetics in Temperatures up to 40oC, Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, The Hague, 1990, 673-676.

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

[Cazzuffi et al., 1997] - D. Cazzuffi, A. Ghinelli, M. Sacchetti, C. Villa European experimental approach to the tensile creep behaviour of high strength geosynthetics Proceedings of the Geosynthetic'97 Conference, Long Beach, USA (1997), pp. 253-266.

[Crawford, 1999] - Crawford, R.J. Plastics Engineering, third ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999, p. 1-40.

- [Christjanson, 2008] – Christjanson, P. (2008), Polümeeriteadus. Tallinn: TTÜ Kirjastus.
- [Dowling, 2007] - Dowling, N.E. (2007). Mechanical behavior of materials, 3rd edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, p912.
- [DuPont] - DuPont™ Tytar® SF GEO TEXTILE technical handbook
- [EBGEO] EBGEO:2010 - Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements
- [Ehrenstein, 2001] Ehrenstein, G. W. (2001), Polymeric Materials. Munich: Hanser.
- [EVS-EN 12224] - EVS-EN 12224:2001 Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the resistance to weathering
- [EVS-EN 12226] - EVS-EN 12226:2012 Geosynthetics - General tests for evaluation following durability testing
- [EVS-EN ISO 10319] - EVS-EN ISO 10319:2015 Geosynthetics - Wide-width tensile test
- [EVS-EN ISO 10321] EVS-EN ISO 10321:2008 Geosynthetics - Tensile test for joints/seams by wide-width strip method
- [EVS-EN ISO 13437] EVS-EN ISO 13437:2019 Geosynthetics - Installing and retrieving samples in the field for durability assessment
- [EVS-EN ISO 9862] - EVS-EN ISO 9862:2005 Geosynthetics - Sampling and preparation of test specimens
- [Goertzen ja Kessler, 2006] - Goertzen, W.K., Kessler, M.R. (2006). Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites, Materials science and engineering A. 421, 217-225.
- [GOST P 55032] - GOST P 55032-2012
- [GOST P 55033] - GOST P 55033-2012
- [Greenwood, Schroeder ja Voskamp, 2012] – Greenwood J. H., Schroeder H. F., Voskamp W. CUR Building & Infrastructure (2012), Report 243, Durability of Geosynthetics, Gouda, Stichting CURNET.
- [Han ja Jiang, 2013] - Han, J., & Jiang, Y. (2013). Use of geosynthetics for performance enhancement of earth structures in cold regions. Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, the University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA, Sciences in Cold and Arid Regions, 5, 517.
- [Hawkins, 1984] Hawkins W.L. (1984) Polymer Degradation. In: Polymer Degradation and Stabilization. Polymers Properties and Applications, vol 8. Springer, Berlin, Heidelberg

[Henry ja Durell, 2007] - Henry K.S., Durell G.R., 2007. Cold temperature testing of geotextiles: new, and containing soil fines and moisture. *Geosynthetics International*, 14(5): 320–329.

[Hsieh ja Tseng, 2008] - Hsieh, Chiwan & Tseng, Yen-Chen. (2008). Tensile creep behavior of a PVC coated polyester geogrid at different temperatures. *Journal of GeoEngineering*, 3, 3, 113-119.

[ISO 12960] ISO 12960:1998 Geotextiles and geotextile-related products — Screening test methods for determining the resistance to acid and alkaline liquids

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

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

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

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

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

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

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

[Lim et al., 2003] - Lim, J.Y., Donahue, H.J., and Kim, S.Y. (2003). Strain rate, temperature, and microstructure-dependent yield stress of poly(ethylene terephthalate), *Macromolecular chemistry and physics*, 204(4), 653-660.

[Lippmaa, 2001] – Lippmaa, H. (2001), *Polümeerisõnastik*. Tallinn: Euroõlikool.

[Milewski, 1988] – Milewski, G.; Targosz, B. (1988). Stress relaxation behaviour in polymers for combined bending and torsion. *Measurement*, 6, 164 – 167.

[Naumann, 2012] – Naumann, T; Stommel, M. (2012), Simulation of the Long Term Behavior of Polymers on the Basis of Short Term Data. *Technische Mechanik*, 32, 446 – 462.

[Nielsen, 1974] - Nielsen, L.E. (1974), Mechanical properties of polymers and composites, Vol. 1, 2, Marcel Dekker Inc., NY.

[Painter ja Coleman, 1997] - Painter, P.C. and Coleman. M.M. (1997), Fundamentals of polymer science, 2nd Ed., CRC press, Boca Raton, FL.

[Petriaev ja Konen, 2008] - A. Petriaev and A. Konen (eds,), Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2, Lecture Notes in Civil Engineering 50] [Journal of GeoEngineering, Vol. 3, No. 3, December 2008.

[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.

[Sang-Sik, 2007] - Sang-Sik, Y. Evaluation of Creep Behavior of Geosynthetics Using Accelerated and Conventional Methods. PhD Thesis, Drexel University, 2007.

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

[Sinclair ja Edgemon, 1969] - Sinclair, J.E., Edgemon, J.W. (1969). Investigation of creep phenomena in polyethylene and polypropylene, Journal of applied polymer science, 13, 999-1012.

[Smeets et al., 2001] - Smeets, P., Jacobs, M., Mertens, M. (2001). Creep as a design toll for HMPE ropes in long term marine and offshore applications, Oceans MTS/IEEE conference, Honolulu, HI. 685-690.

[Yuan, 2017] – Yuan, H. Effectiveness of Wicking Geotextile in Mitigating Freeze-thaw Problems of Aggregate Bases with Fines. Graduation thesis, University of Kansas, 2017.

[Wang et al., 2008] - Wang E.L., Xu X.Y., Zhang B., Zhong H., Gao Z.K., Chang J.D. (2008) Experimental Study on Creep Properties of Plastic Geogrid Under Low Temperature. In: Li G., Chen Y., Tang X. (eds) Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.

[Wang, 2008] - Wang EL, 2008. Experimental Study on Plastic Geogrid and Complex Structure of Hydraulic Reinforced Earth Wall in Seasonally Frozen Area. Doctoral Dissertation, Harbin Institute of Technology, China.

[Wrigley, 1987] - Wrigley, N. E., “Durability and Long-Term Performance of Tensar Polymer Grids for Soil reinforcement,” Material Science Technology, 1987, 161-170.

11. Artikkel Teelehte

Transpordiehitiste konstruktsioonis olevad materjalid ja pinnased, mida on geosünteedidega tugevdatud on allutatud kavandatud eluea jooksul nii püsivale, korduvale või tsüklilisele koormusele. Eeltoodud koormustingimused esinevad katendites, alustes, tugevdatud aluspinnastes ja teega ümbritsevas konstruktsioonis jms. Kui meil ei ole piisavaid teadmisi geosünteedide kui polümeerse materjalide lühi-, keskmise ja pikaajalise toimimise ning pinnase vahelise vastastikuse mõju kohta siis on see takistuseks nende kasutamisel püsivates konstruktsioonides või kui me seda teeme ilma vastava teadmiseta, võime tuua kasu asemel ka hullemal juhul kahju.

Projekteerida vastavaid konstruktsioone on keeruline, kui Tellija näeb ette empiiriliste katsete alusel tüüplahenduste kasutamise milles ei ole olnud kasutusel geosünteedid. Sellisel juhul tüüplahenduste kasutamine projekteerimisel võib tekitada probleeme kuna tüüplahendustes ei ole arvestatud geosünteedide lähtematerjalide ja lisandite mõju erinevates keskkondades. Maailmas on levinud nii poolempiirilised kui tootjapoolsed empiirilised meetodid liikluskõormuse all olevate teede projekteerimisel geosünteedide kasutamiseks. Väga oluline on teada, missuguses konstruktsiooni (kihi) projekteerimisel vastavalt eesmärgile missugusest lähtematerjalist (polümeerist) geosünteedi missugusel kujul kasutada ja missugused täiendavaid nõuded tuleb arvestada nii keskkonnast kui ümbritsevate kihtide omadustest.

Transpordiamet oli sellest probleemist teadlik ja tellis arendustöö „Muldkoha projekteerimine (sh arvutused) ja tüüplahenduste väljatöötamine“, mille üks osa oli eelpooltoodud probleemi selgitamine ja vastavate ettepanekute tegemine oludes kus geosünteedika on üks alternatiivseid tee konstruktsiooni tugevdavaid ja veerežiimi korrigeerivaid meetmeid. Taltech'i ülesandeks oli seatud pärast täiendavat teoreetilist analüüsi (st sarnase kliima ja geotehniliste tingimustega riikide geosünteedika standardite, teaduslike uurimistööde ja juhendmaterjalide läbitöötamist) ja vajadusel täiendavate katseseadmete konstrueerimist ning vajalike katsete teostamist eeltoodu alusel välja töötada meetodikad geosünteedide pikaajalise vastupidavuse kiirendatud hindamiseks lähtuvalt Eestis esinevates spetsiifilistest kliimaatilistest või keskkonna keemilistest oludest. Meetodikad olid mõeldud kasutamiseks geosünteedika katsetamisel, mille tulemusel oleks saadud nn kohalikud vähendusfaktorid. Need on mõeldud sisendina teise osasse arendustööst mida juhtis IPT Projekti juhtimine - kaasaegsete geotehniliste lahenduste rakendamine teedehituses oludes kus Eurokoodeks on kohustuslik ja selle teist põlvkonda valmistati ette kehtestamiseks. IPT koostatud juhend „Geosünteedika kasutamine tee konstruktsioonis“ võimaldab kasutada Taltech'i poolt väljatöötatud meetodikate alusel tehtud katsete alusel kasutada vähendusfaktoreid, mis võimaldavad hoida kokku nii loodusressursse kui raha. Seega oli see väga oluline koostöö, kus mõlemad pooled andsid oma sisendi teise poole arendustöösse.

Tööde tulemusel valmisid kiirendatud vanandamise meetodikad ning tehti mõned olulised järeldused ning koostati alljärgnevad olulisemad soovitused:

- Eesti tee ehitusobjektidel kasutatavate enamlevinud geosünteedide polümeersed lähtematerjalid on polüetüleentereftalaat (PET, kuulub polüestrite rühma), polüpropüleen (PP) ja polüetüleen (PE või HDPE). **Polüestrid ja aramiid on tundlikud leeliselise keskkonna suhtes - seega ei või neid kasutada kokkupuutes põlevkivituhaga, tsemendi või lubjakiviga kui keskkonna pH on üle 12.** Töö raames tehtud katsete tulemused kinnitavad, et PET põhised geosünteedid ei sobi kindlasti kasutamiseks põlevkivituhaga, eriti värske põlevkivituhaga leostusveega kokkupuutel. **Kui kasutuskeskkonna pH on**

vahemikus 9-11, siis erandkorras võib ette näha geosünteedide kasutamist peale tootespetsiifiliste uuringute läbiviimist.

- Proovide võtmisel ja katsekehade ettevalmistamisel ning nende hoidmisel on oluline mõju katsete lõpptulemusele, seega on vaja nii proovivõtjate kui ka katsetajate pädevuse sertifitseerimine. **Soovitame kasutusele võtta analoogse dokumendi geotehniliste uuringute ja katsetamise kvaliteedi ja hindamise standardiseeriale ISO/TS 24283 millega analoogselt saab määrata nii kvalifitseeritud proovivõtja ja katsetaja kui ka vastutava eksperdi ning ettevõtte nõuded.**
- Geosünteedide kui viskoelastsete polümeeride mehaanilised omadused sõltuvad oluliselt temperatuurist ning seega nende kasutamise tingimused sõltuvad geosünteedi paigalduse asukohast ja sügavusest. Sügavuse kasvades temperatuuri aastaringne kõikumine väheneb ning stabiliseerub viimaks vahemikus 8-10°C. Kõige kriitilisem on temperatuuri kõikumiste mõju paigaldusel kuni 1 m sügavuseni.
- Geosünteedi klaasisiirdetemperatuur on temperatuur, millest madalamal temperatuuril on materjal tugev kuid habras, kõrgemal temperatuuril deformeeritavam, kuid tugevus väheneb temperatuuri kasvuga. PP ja PE/HDPE on Eestis tavapäraselt esinevate välistemperatuuride puhul peamiselt kummiolekus ja PET klaasiolekus. Minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul tuleb arvestada kõrgeima kasutustemperatuuriga ja maksimaalse purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga, mida **tuleb arvestada tee konstruktsiooni projekteerimisel teostades arvutusi. Kui ehitaja soovib kasutada erineva koostisega polümeeri kui see, millel põhinevad projekti arvutused, siis tuleb need arvutused uuesti teostada soovitava polümeeriga.**
- Enamlevinud geosünteed, PP võib olla Eesti kliimaoludes roome suhtes tundlik valdava osa aastast, erandiks on talvised temperatuurid allpool -10°C. Probleem suureneb suvise kuumuse tingimustes. Samas on kummiolek paigalduse suhtes soodus, kuna materjal ei käitu siis painutamisel hapralt.

Teiseks levinud geosünteed PET on kogu Eesti kasutustemperatuuride vahemikus klaasiolekus. Seetõttu on selle materjali roomekindlus suurem. Valdavalt kiulise struktuuri korral ei ole klaasiolek painduvuse mõttes probleemiks ja PET sobib kasutamiseks laias temperatuurivahemikus. PET roomet takistab ka makromolekulide suhteline jäikus ja suure benseenituumade esinemine peaaheas. Üldiselt võib öelda, et PET omadused on Eesti kasutustingimustes vähem temperatuurist sõltuvad kui PP omadused. Kuigi määrad on erinevad, kasvab pikaajaline roome nii PP kui PET puhul temperatuuri suurenedes. **Projekteerimisel tuleb tagada, et geosünteedi eeldatav roome ei ületaks materjali kasuliku eluea jooksul ette nähtud maksimaalse deformatsiooni ulatust või ei viiks materjali purunemiseni.**

Geosünteedide purunemispinge temperatuuri alanemisel kasvab ja seega ei ole tugevus madalatel temperatuuridel projekteerimisel probleemiks. Probleemiks võib aga olla purunemisdeformatsioon, mida ei tohi materjalide kasutamisel madalatel temperatuuridel ületada. **Projekteerimisel tuleb minimaalse eksploatatsioonilise purunemispinge puhul arvestada kõrgeima kasutustemperatuuriga ja purunemisdeformatsiooni korral madalaima kasutustemperatuuriga.**

Geosünteedide kiirendatud keemilise vanandamise protseduur

KOOSTAJAD:

MERIT RIKKO
ANDRES KRUMME

Sisukord

1.	Käsitlusala	55
2.	Normiviited	55
3.	Terminid, definitsioonid, lühendid ja sümbolid	55
3.1	Definitsioonid.....	55
3.2	Lühendid	55
3.3	Sümbolid	55
4.	Sissejuhatus	56
5.	Katsetingimused	56
5.1	Aparatuur	56
5.2	Vanandamise keskkond	56
5.3	Vanandamise katse temperatuur	57
5.4	Vanandamise katse kestvus	57
5.5	Katsekehad.....	57
6.	Protseduur.....	58
6.1	Lahuse kogus.....	58
6.2	Katsekehade paigutus.....	58
6.3	Katsekehade loputamine ja kuivatus	58
6.4	Mehaaniliste omaduste muutuste määramine	58
7.	Raport	61

1. Käsitlusala

Käesolev dokument kirjeldab protseduuri, kuidas teostatakse geosünteedide kiirendatud keemilise vastupidavuse katsed, koostatud lähtudes võimalikest ohuallikatest keskkonnas, kuhu geosünteed paigaldatakse teede ehituse käigus. Protseduur sobib kasutamiseks ka teiste geotehniliste projekteerimiste tarbeks.

2. Normiviited

Alljärgnevalt loetletud dokumendid, mille kohta on käesolevas dokumendis esitatud normiviited on kas tervenisti või osaliselt vajalikud antud dokumendi rakendamiseks.

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

EN 12226, Geosynthetics - General tests for evaluation following durability testing

ISO 12960, Geotextiles and geotextile-related products – Screening test method for determining the resistance to liquids [acids and alkalis]

EN ISO 9862, Geosynthetics — Sampling and preparation of test specimens

EN ISO 10319, Geosynthetics — Wide-width tensile test

ISO 3696, Water for analytical laboratory use — Specification and test methods

ISO 554, Standard atmospheres for conditioning and/or testing — Specifications

3. Terminid, definitsioonid, lühendid ja sümbolid

3.1 Definitsioonid

3.1.1

Vähendusfaktor

tegur (> 1), millega tõmbetugevus läbi jagatakse, et võtta arvesse konkreetseid kasutustingimusi ja tuletada pikaajaline tugevus

3.1.2

Iseloomulik tugevus

Geosünteedi tõmbetugevuse 95% (kahepoolne) alumine usalduspiir, mis on ligikaudu võrdne keskmise tugevusega, millest on lahutatud kaks standardhälvet

3.2 Lühendid

Ca(OH) ₂	Kaltsiumhüdroksiid
AU	Alumine usalduspiir
Na ₂ CO ₃	Naatriumkarbonaat
NAT	Trinaatriumnitriilotriatsetaat

3.3 Sümbolid

b _a	Arrheniuse graafiku gradient
B	Jõuvahemiku täpsus
F _c	Kontrollkatsekehade keskmine tõmbetugevus
F _e	Testkatsekehade keskmine maksimaalne tõmbekoormus
L	Haaratsite vaheline kaugus
n	Arrheniuse punktide arv
R ₂	Suhe, mis tähistab Arrheniuse valemist tuletatud tugevuse määramatust
R _{CH}	Vähendusfaktor

R_F	Säilinud tõmbetugevuse protsent ehk jääktugevus
S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}	Regressioonisirgete tuletamisel kindlaksmääratud ruutude summa
σ_0	Standardhälve alumise usalduspiiri arvutamisel
t_{90}	Kulunud aeg 90% jääktugevuse saavutamiseks
t_{AU}	Kulunud aja alumine usalduspiir kindlaksmääratud jääktugevuse saavutamiseks kasutustemperatuuril
t_{n-2}	Student t vabadusastme $n-2$ ja kindlaksmääratud tõenäosuse juures
t_s	Kulunud aeg kindlaksmääratud jääktugevuse saavutamiseks kasutustemperatuuril
T_{char}	Geosünteedile iseloomulik tugevus (laiuse kohta)
T_j	Kiirendatud vanandamise katse temperatuur
T_K	Temperatuur
T_{AU}	Geosünteedile iseloomuliku tugevuse T_{char} alumine usalduspiir
T_s	Kasutustemperatuur
x	Abstsiss
$\bar{x}$	x_i keskmine väärtus
x_i	Üksiku punkti abstsiss
y	Ordinaat
$\bar{y}$	y_i keskmine väärtus
y_i	Üksiku punkti ordinaat

4. Sissejuhatus

Kiirendatud keemiline vanandamine viiakse läbi vastavalt ISO/TR 20432 juhistele. Mõõdetavaks parameetrik on ekstrapoleerimise teel saadud aeg, mis kulub uuritava keskkonna keemiliste mõjurite toimel tõmbetugevuse vähenemiseks 10% võrra võrreldes algse tõmbetugevusega.

5. Katsetingimused

5.1 Aparatuur

- 1) Vähemalt 4L klaasist anum tihendatava kaanega – katsekehade lahuses hoidmiseks määratud ajaperioodil, anum suurus peab tagama et vanandamise lahuse kaal olema 30 korda suurem kui katsekeha kaal.
- 2) Klaaspulgad – vältimaks katsekehade tihedalt anuma seinte ja teineteise vastas olemist
- 3) Termokapp, täpsusklassiga $\pm 0,3$ °C – vajaliku temperatuuri saavutamiseks ja hoidmiseks
- 4) pH-meeter – lahuse pH regulaarseks kontrollimiseks
- 5) Tõmbemasin, mis on suuteline määrama uuritavate geosünteedide tõmbetugevust vähemalt 10kN jõuga, mille täpsusaste on 10N ja mis on sobiv EVS EN ISO 13109 katsete läbiviimiseks

5.2 Vanandamise keskkond

Lähtudes Eesti oludest ja võimalikest ohuallikatest geosünteedidele, viiakse vanandamise katsetused läbi järgnevatel keskkondades:

- 1) Vesilahus naatriumi põhise teehoolduskemikaaliga (neutraalne kontrollkeskkond);
- 2) Elektritootmise värsket tuha leostusvesi (tugevalt aluseline keskkond);
- 3) Rabavesi (happeline keskkond).

5.3 Vanandamise katse temperatuur

Silmas pidades, et keemilised reaktsioonid on üldjuhul madalamatel temperatuuridel aeglasemad ja võivad mõningatel juhtudel kesta aastaid, teostatakse kiirendatud vanandamise katsed temperatuuridel: 60, 70, 80, 90°C.

5.4 Vanandamise katse kestvus

EVS EN ISO 12960 standardist lähtuvalt on kontrollkatsekehi 5 ning nende tõmbetugevust testitakse vastavalt EVS EN ISO 10319 järgi + 20°C juures. Testkatsekehade tõmbetugevust mõõdetakse peale vanandamist neljal erineval temperatuuril 5 korda 5 paralleelkatsena. Ühes konkreetses keskkonnas testitakse kokku 100 katsekeha.

Tabel 1 esitab ligikaudse katsekehade keemilise vanandamise ajakava toetudes ISO/TR 20432 esitatud katseplaanile. Tabelis esitatud vanandamise aeg võib lüheneda või pikeneda tulenevalt mehaaniliste katsetuste tulemustest, kui tõmbekatsete tulemustest tuleneb, et jääktugevus väheneb oodatust kiiremini või aeglasemalt.

Tabel 1. Katsekehade keemilise vanandamise ajakava.

Temperatuur	1.mõõtmine	2.mõõtmine	3.mõõtmine	4.mõõtmine	5.mõõtmine
90 °C	3 päeva (72h)	6 päeva (144h)	9 päeva (216h)	13 päeva (312h)	20 päeva (480h)
80 °C	7 päeva (168h)	10 päeva (240h)	14 päeva (336h)	20 päeva (480h)	28 päeva (672h)
70 °C	14 päeva (336h)	24 päeva (576h)	36 päeva (864h)	42 päeva (1008h)	55 päeva (1320h)
60 °C	24 päeva (576h)	36 päeva (864h)	55 päeva (1320h)	68 päeva (1632h)	83 päeva (1992h)

5.5 Katsekehad

Katsekehad valmistatakse vastavalt EVS EN ISO 9862 standardile. ISO/TR 20432 kohaselt tuleb jääktugevuse määramiseks eelistada laiu katsekehi. Sellest lähtuvalt on vastavalt ISO 10319 standardile valitud katsekehade mõõdud, sõltuvalt geosünteedi tüübist, tabelis 2.

Tabel 2. Katsekehade mõõdud ja katsetingimused

Geosünteedi tüüp	Katsekeha pikkus	Katsekeha laius	Katsetingimused (Haaratsite vaheline kaugus L; Jõuvahemiku täpsus B)
Mittekootud ja silmkootud geotekstiilid, geovõrgud, geomatid	200mm	200mm ± 1mm	L= 100 ±3 mm; B=10N
Lõimkootud geosünteedid	200mm	200mm ± 1mm (lõigata alguses 220mm)	L= 100 ±3 mm; B=10N
Geovõred	200 – 400mm	200mm ± 1mm	L ≥ 100 ±3 mm; B=10N

6. Protseduur

6.1 Lahuse kogus

Vastavalt EN 12960 standardile on keemilise vanandamise lahuse kaal 30 korda suurem kui katsekehade kaal ja lahus peab katma katsekeha täielikult.

6.2 Katsekehade paigutus

Vastavalt EVS EN ISO 12960 p 4.6.2 asetatakse katsekehad anumasse lahtiselt, ilma märkimisväärse mehaanilise pingeta. Keskmine katsekehade vaheline distant, anuma seinte ja katsekehade vaheline distant ning katsekehade ja vedeliku pinna vaheline distant peab olema vähemalt 10mm. Erinevatest materjalidest katsekehi tuleb testida erinevates anumates. Katsekeskkonna vedeliku halb konvektsioon ei tohi takistada aktiivse komponendi ülekandumist vedelikult geosünteedile. Anumat vedeliku ja katsekehadega tuleb kaitsta otsese päikesevalguse eest. Lahuseid segatakse korra päevas, tehes anumad käes hoides intensiivseid ringjaid liigutusi 1 minuti jooksul, et säilitada vedeliku homogeensus ning aktiivse komponendi ülekandumine vedelikust katsekehale. Lahuse pH-d tuleb mõõta ja protokollida vähemalt igal seitsmendal päeval ning vajadusel alge pH säilitamiseks lahus asendatakse.

6.3 Katsekehade loputamine ja kuivatus

Vastavalt EVS EN ISO 12960 p 4.6.4 tuleb enne mehaaniliste omaduste testimist katsekehi loputada, et eemaldada keemilise mõjutuse ained. Kõigepealt loputatakse veega (vastavalt ISO 3696 standardile), seejärel 0,01M naatriumkarbonaadi (Na_2CO_3) lahuses ja viimasena taas veega. Vedelike kogused peavad olema piisavad, et tagada puhastus.

Kui polüester geosünteedid puutuvad kokku kaltsiumhüdroksiidiga ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), siis peab eemaldama ka kaltsiumtereftalaadi kokkukleepunud kristallid. Selleks tuleb geosünteedi loputada 5 min 10% (kaalu järgi) trinaatriumnitriilotriatsetaadi (NTA) lahusega segades või loksutades. Seejärel loputatakse 3% (kaalu järgi) äädikhappe lahusega ja siis uuesti veega.

Katsekehi kuivatatakse koormust rakendamata toatemperatuuril.

6.4 Mehaaniliste omaduste muutuste määramine

Peale vanandamise keskkonnast eemaldamist tuleb katsekehasid vaadelda, tuvastamaks nähtusi, mis võivad vananemise kiirust mõjutada. Selleks võib olla mikropragude esinemine või värvimuutused võrreldes kontrollkatsekehaga. Vajadusel tuleb katsekehi uurida mikroskoobiliselt suurendusega umbes 250 korda. Kõik leitud kõrvalekalded tuleb protokollida ja kajastada katse raportis.

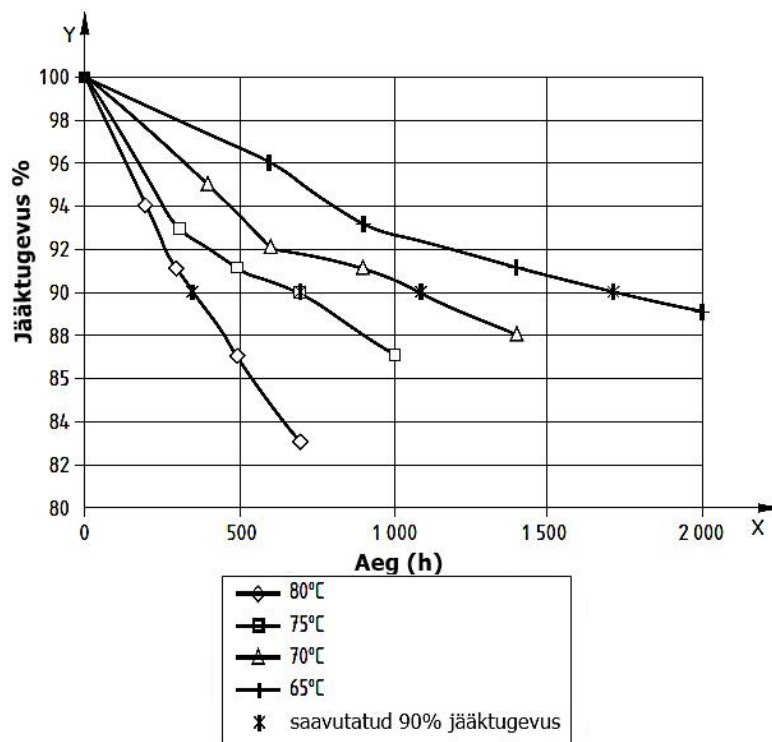
Vastavalt EVS EN ISO 12226 ning EVS EN ISO 10319 standarditele tuleb katsekehi enne tõmbeomaduste testimist konditsioneerida ja testida standardtingimustes, $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ja $65 \pm 5\%$ suhtelise õhuniiskuse juures, nagu määratud ISO 554 standardis. Katsekehad võib lugeda konditsioneerituks, kui nende massi muutus järjestikuste kaalumiste järel ei ületa 0,25% katsekeha massist. Kaalumisi tuleb teha kindla intervalli tagant, aga mitte vähem kui iga 2 tunni tagant. Katsekehade konditsioneerimise võib ära jätta, kui on olemas tulemused, mis näitavad, et sama tüüpi toodet (nii struktuuri kui ka polümeeri poolest) ei mõjuta temperatuuri ega niiskuse muutused vastavates piirides.

Tõmbekatse tehakse vastavalt EVS EN ISO 10319 standardile, vastavad tingimused on välja toodud ka Tabelis 2. Seejärel tuleb vastavalt EVS EN ISO 12226 p 6.1 arvutada testkatsekehadele keskmine maksimaalne tõmbetugevus Fe ja standardhälve ning

kontrollkatsekehadele keskmine tõmbetugevus F_c ja standardhälve. Nende väärtuste põhjal arvutatakse jääktugevus R_F , ühe kümnendkoha täpsusega vastavalt järgmisele võrrandile:

$$R_F = \frac{F_e}{F_c} \times 100 (\%)$$

Saadud tulemuste põhjal tuleb koostada graafik, kus esitatakse jääktugevuse sõltuvus keemilise vanandamise kestvusest rakendatud temperatuuridel. Näide graafikust on esitatud Joonisel 1.



Joonis 1. Näide jääktugevuse muutusest ajas sõltuval temperatuuril. [allikas: ISO/TR 20432]

Lähtudes Arrheniuse võrrandist tuleb Joonise 2 põhjal koostada graafik, kus y-teljel on aeg (h), mis kulus 90% jääktugevuse saavutamiseks vastava absoluutse temperatuuri pöördväärtuse $1/T_K$ (K) juures. Arrheniuse valem kehtib siis kui graafik on sirgjooneline. Vastasel juhul pole ekstrapoleerimine võimalik.

Valem sirgjoone arvutamiseks on järgmine:

$$y = \bar{y} + b_a(x - \bar{x}),$$

kus $y = \log t_{90}$ ja $x = \frac{1}{T_j}$

$$b_a = \frac{s_{xy}}{s_{xx}};$$

$$s_{xx} = \sum (x - \bar{x})^2;$$

$$s_{yy} = \sum (y - \bar{y})^2;$$

$$s_{xy} = \sum (x - \bar{x})(y - \bar{y});$$

Arvutama peab ka sirge alumise usalduspiiri, vastavalt:

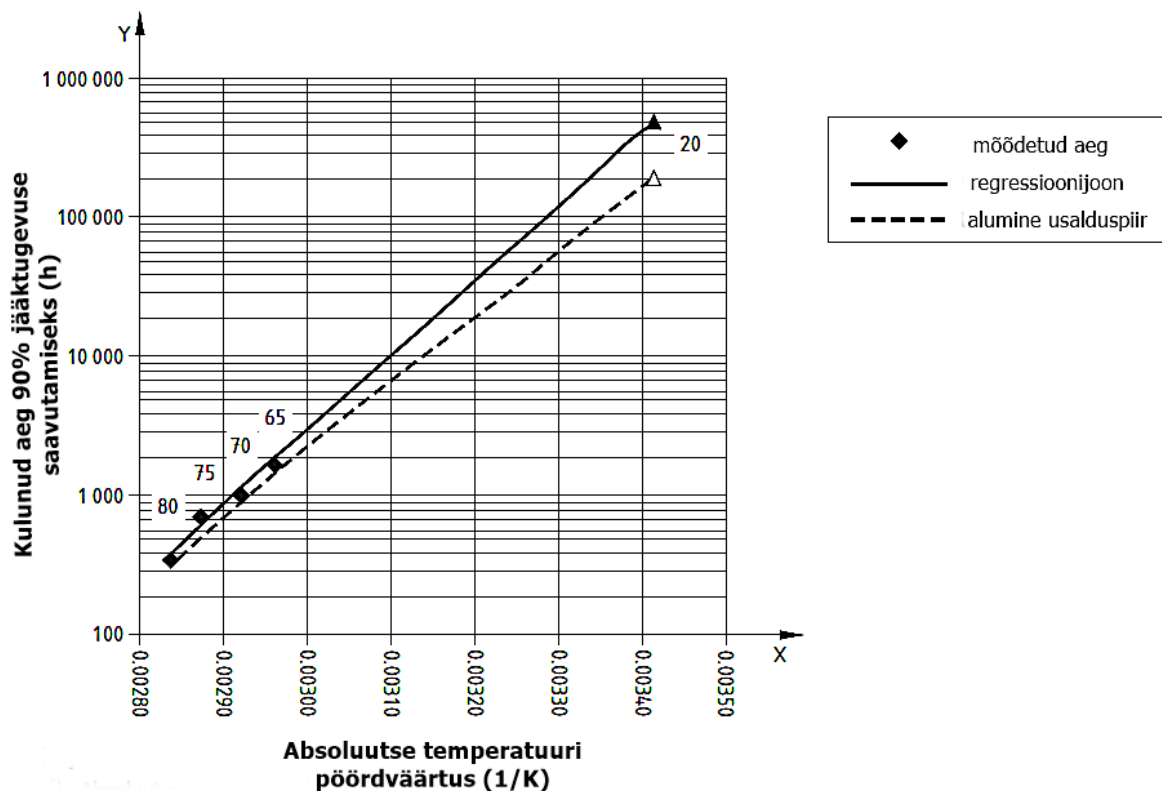
$$y = \bar{y} + b_a(x - \bar{x}) - t_{n-2}\sigma_0 \sqrt{\left[1 + \frac{1}{n} + (x - \bar{x})^2/s_{xx}\right]}$$

kus

t_{n-2} = Student t vabadusastme $n-2$ ja kindlaksmääratud tõenäosuse juures;

n = Arrheniuse punktide arv;

$$\sigma_0 = \sqrt{\left[\frac{(s_{yy} - s_{xy}^2/s_{xx})}{(n-2)}\right]};$$



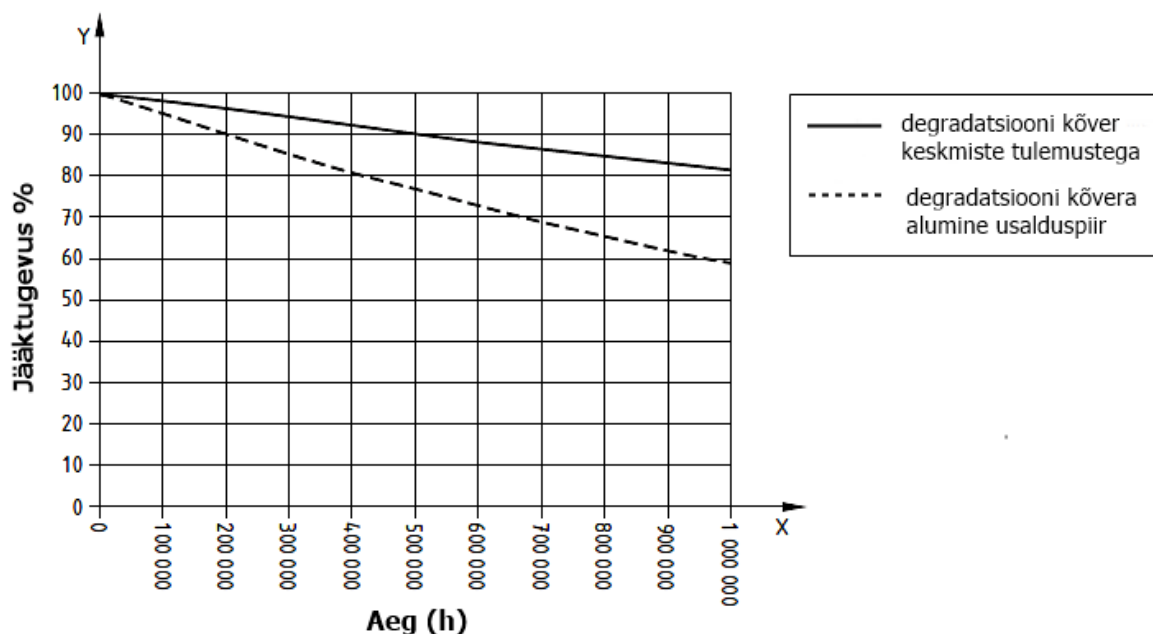
Joonis 2. Näide regressioonijoonest 90% jääktugevuse saavutamise aeg absoluutse pöördvõrdelise temperatuuri juures. [allikas: ISO/TR 20432]

Jooned peavad olema graafikul joonestatud nii nagu Joonisel 2. Regressioonijoonelt tuleb leida aeg t_s , kus on määratud jääktugevus kasutustemperatuuril $x = \frac{1}{T_s}$; alumise usalduspiiri joonelt tuleb leida aeg t_{AU} , kus on samuti määratud jääktugevus kasutustemperatuuril. Näiteks Joonise 2 puhul on need väärtused vastavalt 516 000 h ja 199 000 h. Selline suur erinevus on tüüpiline logaritmiskaala puhul.

Joonisel 3 on näide degradatsiooni kõverast. Degradatsiooni kõvera joonistamisel tuleb lähtuda 90% jääktugevuse saavutamisest aja t_s jooksul (vastavalt sellele saadakse kõvera kaldenurk). Kõveralt tuleb leida pikaajaline tugevus T_{char} (%) vastavalt tootja lubatud toote elueale ja arvutada vähendusfaktor $R_{CH} = \frac{100}{T_{char}}$

Sarnaselt tuleb tuletada ka degradatsiooni alumise usalduspiiri kõver (AU), vastavalt siis ka 90% jääktugevuse saavutamisest aja t_{AU} jooksul. Kõveralt tuleb leida alumise usalduspiiri pikaajaline tugevus T_{AU} (%) vastavalt tootja lubatud toote elueale. Arvutada suhe $R_2 = \frac{T_{char}}{T_{AU}}$, mis tähistab Arrheniuse valemist tuletatud tugevuse määramatust.

Joonise 3 põhjal $T_{char}=81,5\%$ 1 000 000 h juures. $R_{CH}=100/81,5=1,23$. $T_{AU}=58,8\%$ 1 000 000 h juures. $R_2=81,5/58,8=1,39$.



Joonis 3. Näide degradatsiooni kõverast kasutustemperatuuril. [allikas: ISO/TR 20432]

7. Raport

Katse raport peab sisaldama:

- Viidet käesolevale dokumendile;
- Kliendi nime;
- Töövõtja nime;
- Katsetatud materjalide kirjeldust, sh nende iseloomulikke omadusi (polümeerne koostis ja lisaainete kogused);
- Viidet katsekehade võtmise aruandele, kus on määratletud katsekehade võtmise asukoht jm oluline katse tulemust mõjutada võiv teave;
- Kasutatud aparatuur ning nende mõõtmisparameetrid;
- Katse keskkond;
- Katsetatavate ühikute arvu;
- Katse kuupäeva;
- Kasutatud temperatuure, sh kuivatamise temperatuuri;
- Võimalike kõrvalekaldeid protseduurist või muidu faktoreid, mis võivad tulemusi mõjutada;
- Katsetulemusi ja järeldusi;

Protseduur temperatuuri mõju hindamiseks geovõrkude tõmbeomadustele

KOOSTAJAD:

MERIT RIKKO
ANDRES KRUMME

Sisukord

Sisukord.....	63
1. Käsitusala	64
2. Normiviited	64
3. Terminid, definitsioonid ja sümbolid	64
3.1 Definitsioon.....	64
3.2 Sümbolid	64
4. Sissejuhatus	64
5. Katsetingimused	65
5.1 Aparatuur.....	65
5.2 Katse temperatuur.....	65
5.3 Katsekehad	65
6. Protseduur.....	66
6.1 Tõmbetugevuse ja tõmbedeformatsiooni mõõtmine	66
7. Raport.....	67

1. Käsitusala

Käesolev dokument kirjeldab protseduuri, kuidas teostatakse tugevdamise eesmärgil kasutatavate geovõrkude temperatuuri mõju hindamise katsed.

2. Normiviited

Alljärgnevalt loetletud dokumendid, mille kohta on käesolevas dokumendis esitatud normiviited on kas tervenisti või osaliselt vajalikud antud dokumendi rakendamiseks.

EVS EN ISO 9862, Geosynthetics — Sampling and preparation of test specimens

EVS EN ISO 10319, Geosynthetics — Wide-width tensile test

3. Terminid, definitsioonid ja sümbolid

3.1 Definitsioon

3.1.1

Maksimaalne tõmbejõud

Katsekeha purunemiseks rakendatud maksimaalne tõmbejõud ($F_{\max}$) väljendatuna kilonjuutonites (kN).

3.1.2

Tõmbedeformatsioon

Ehk purunemisdeformatsioon, katsekeha protsentuaalne pikenemine tõmbel purunemiseni. Tähistatakse ε (epsilon).

3.1.3

Tõmbetugevus

Maksimaalne tõmbejõud laius ühiku kohta, mis on vajalik materjali purunemiseks ($T_{\max}$). Väljendatud kui kilonjuutonit meetri kohta (kN/m).

3.2 Sümbolid

B	Jõuvahemiku täpsus
c	Keskmise tõmbeelementide arv ühe meetri laiuses suhe katsekeha tõmbeelementide arvu
$F_{\max}$	Maksimaalne tõmbejõud (kN)
ε	Tõmbedeformatsioon (%)
$\varepsilon_{\text{char}}$	Geosünteedile iseloomulik deformatsioon (%)
L	Haaratsite vaheline kaugus
N_m	Keskmine tõmbeelementide arv katsetatava geovõrgu ühe meetri laiuses
n_s	Tõmbeelementide arv katsekehal
T_{char}	Geosünteedile iseloomulik tugevus (laiuse kohta)
$T_{\max}$	Materjali tõmbetugevus väljendatuna kilonjuutonites meetri kohta (kN/m)

4. Sissejuhatus

Temperatuuri mõju uurimiseks katsetatakse geovõrkude tõmbeomadusi kliimakambris erinevate temperatuuride juures vastavalt EVS ISO EN 10319 standardile. Mõõdetavateks parameetriteks on tõmbetugevus ja venimine maksimaalse koormuse juures erinevatel temperatuuridel.

5. Katsetingimused

5.1 Aparatuur

- 1) Tõmbemasin, mis on suuteline määrama uuritavate geosünteedide tõmbetugevust vähemalt 10kN jõuga, mille täpsusaste on 10N ja mis on sobiv EVS EN ISO 13109 katsete läbiviimiseks.
- 2) Kliimakamber, mis koosneb:
 - a. Termostaadist, täpsusklassiga $\pm 0,2$ °C – vajaliku temperatuuri saavutamiseks ja säilitamiseks.
 - b. Temperatuuriandurist – kliimakambris oleva õhutemperatuuri info edastamiseks.
 - c. Ventilaatoriga kalorifeer - kambris ringleva õhu tekitamiseks.
 - d. Temperatuuri kontrollierist – kalorifeeri töö reguleerimiseks, et kambris oleks etteantud temperatuur.
- 3) Haaratsid – katsekehade kindlalt kinni hoidmiseks kogu nende laiuse ulatuses.
- 4) Katsekehade konditsioneerimisest – katsekehade konditsioneerimiseks katsetemperatuuril enne tõmbeomaduste mõõtmist.

5.2 Katse temperatuur

Arvestades Eesti geograafilist asukohta, siis võib aasta lõikes õhutemperatuur kõikuda suvisel ajal +30 °C kuni talviste -30 °C-ni, mistõttu võib ka pinnase temperatuur aastaringselt palju kõikuda. On oluline eristada sügavusi, kuhu geovõrk tugevdamise eesmärgil konstruktsioonis paigaldatakse, sest teekatte pinnale lähemal olevates kihtides on temperatuuri gradient oluliselt suurem võrreldes pinnase sügavamate kihtidega. Peamiselt võib eristada kolme erinevat sügavust:

1. 0 – 1 m, pinnase temperatuur sõltub suuresti õhutemperatuurist, talvisel perioodil võib see läbi külmuda ning suvisel kuumaperioodil tõusta ka õhutemperatuurist kõrgemale.
2. 1 – 10 m, õhutemperatuur avaldab endiselt mõju, kuid temperatuuri kõikumine on aasta lõikes väiksem võrreldes alla 1 m sügavusega. Pinnase läbikülmumist ei esine ning õhutemperatuurist kõrgemaks pinnase temperatuur ei tõuse.
3. Sügavamal kui 10 m, õhutemperatuur mõju ei avalda ning pinnase temperatuur püsib aasta lõikes konstantsena 8 – 10 °C juures.

Tulenevalt asjaolust, et geovõrke paigaldatakse konstruktsioonides erinevatele sügavustele, viiakse temperatuuri mõju hindamiseks geovõrkudele katsetused läbi -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C juures, vajadusel ka teistel temperatuuridel (näiteks asfaldi geovõrkude puhul +50 °C ja +60 °C ning -20 °C.)

5.3 Katsekehad

Proovid võetakse ja katsekehad valmistatakse vastavalt EVS ISO EN 9862 ja EVS ISO EN 10319 standardile. Geosünteedide tõmbetugevuse katsetused viiakse läbi vastavalt ISO 10319 standardile. Tabelis 1 on ära toodud katsekehade mõõtmed sõltuvalt geosünteedi tüübist. Iga katse temperatuuri juures tehakse viis paralleelkatset nii masina suunal kui ka ristimasina suunale, va ühesuunaliste geosünteedide puhul, kus ristimasina suunale testimine pole vajalik.

Tabel 1. Katsekehade mõõdud ja katsetingimused

Geosünteed	Katsekeha pikkus	Katsekeha laius	Katsetingimused (Haaratsite vaheline kaugus L; Jõuvahemiku täpsus B)
Geovõrgud	200 – 700 mm	200 mm ± 1 mm	$L \geq 100 \pm 3$ mm; B=10 N

6. Protseduur

6.1 Tõmbetugevuse ja tõmbedeformatsiooni mõõtmine

Tõmbekatsed tehakse vastavalt EVS ISO EN 10319 standardile, vastavad tingimused on välja toodud ka Tabelis 1. Kliimakambris peab olema saavutatud katsetemperatuur enne katsekehade haaratsite vahele paigutamist ning katsekehi tuleb eelnevalt ka konditsioneerida ettenähtud katsetemperatuuril minimaalselt 2 tundi. Katsekeha tuleb konditsioneerimise keskkonnast eemaldada vahetult enne tõmbeomaduste mõõtmist, et konditsioneerimisel saavutatud katsekeha sisetemperatuur säiliks. Pärast katsekeha paigaldamist haaratsite vahele tuleb oodata kuni kambris on taastunud ettenähtud katsetemperatuur ning oodata veel lisaks 2-3 minutit, et kindlustada ka sarnane temperatuur katsekehal. Seejärel võib alustada katsekeha tõmbeomaduste mõõtmist. Protokollida tuleb maksimaalne tõmbejõud F_{max} , deformatsioon ϵ maksimaalsel koormusel täpsusega 0,1% ning arvutada materjali tõmbetugevus T_{max} kasutades järgnevat valemit:

$$T_{max} = F_{max} \times c, \text{ kus } c = \frac{N_m}{n_s}$$

F_{max} = protokollitud maksimaalne tõmbejõud kilonjuutonites (kN)

N_m = keskmine tõmbeelementide arv katsetatava geovõrgu 1 m laiuses

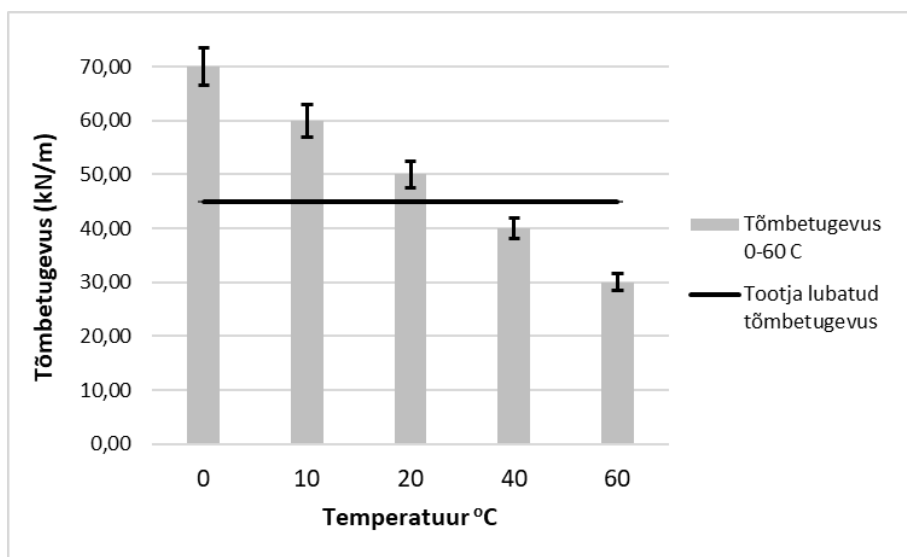
n_s = tõmbeelementide arv katsekehal

Järgmise sammuna tuleb koostada arvutatud tõmbetugevuse T_{max} (koos standardhälbega) ja katsetemperatuuride vahelise sõltuvuse graafik, millele on kantud materjalile iseloomulik tootja lubatud tõmbetugevus T_{char} . Illustreeriv näide graafikust on esitatud Joonisel 1.

Sarnaselt tuleb koostada ka katsetemperatuuride ja tõmbedeformatsiooni ϵ (koos standardhälbega) vahelise sõltuvuse graafik, millele on kantud ka katsetatud materjalile iseloomulik tootja lubatud tõmbedeformatsioon ϵ_{char} .

Koostatud graafikute põhjal tuleb hinnata temperatuuri mõju tõmbetugevusele ja tõmbedeformatsioonile ning võrrelda ka tootja poolt ettenähtud väärtustega. Üldjuhul tõmbetugevus paraneb madalatel temperatuuridel, kuid sealjuures väheneb ka tõmbedeformatsioon ehk materjal muutub hapramaks. Kõrgematel temperatuuridel seevastu materjali tõmbetugevus halveneb ning tõmbedeformatsioon suureneb ehk materjal muutub elastsemaks. Nagu eelpool mainitud, siis sõltuvalt sügavusest võib pinnase temperatuur aasta lõikes kõikuda, mistõttu on oluline veenduda, et sõltuvalt geovõrgu paigaldussügavusest jäävad materjali tõmbeomadused suvistel kõrgematel temperatuuridel ning purunemisdeformatsioon madalatel talvistel temperatuuridel materjali ja paigaldiste disainis ette nähtud piiresse.

Tulenevalt tulemuste analüüsist tuleb hinnata ning teha ettepanek, millistele sügavustele on sobilik uuritavat geovõrku paigaldada, ilma et temperatuur mõjutaks geovõrgu funktsiooni täitmist tee konstruktsioonis.



Joonis 2. Illustreeriv näide tõmbetugevuse ja katsetemperatuuride vahelises sõltuvuse graafikust.

7. Raport

Katse raport peab sisaldama:

- Viidet käesolevale dokumendile;
- Kliendi nime;
- Töövõtja nime;
- Katsetatud materjalide kirjeldust, sh nende iseloomulikke omadusi (polümeerne koostis ja lisaainete kogused);
- Viidet katsekehade võtmise aruandele, kus on määratletud katsekehade võtmise asukoht jm oluline katse tulemust mõjutada võib teave;
- Kasutatud aparatuur ning nende mõõtmisparameetrid;
- Katse keskkonda;
- Katsetatavate ühikute arvu;
- Katse kuupäeva;
- Kasutatud temperatuure;
- Võimalike kõrvalekaldeid protseduurist või muidu faktoreid, mis võivad tulemusi mõjutada;
- Katsetulemusi ja järeldusi;

Geovõrkude kiirendatud ruumekäitumise hindamise protseduur

KOOSTAJAD:

MERIT RIKKO
ANDRES KRUMME

Sisukord

Sisukord.....	69
1. Käsitusala	70
2. Normiviited	70
3. Terminid, definitsioonid, lühendid ja sümbolid	70
3.1 Definitsioonid.....	70
3.2 Lühendid	70
3.3 Sümbolid	70
4. Sissejuhatus	71
5. Katsetingimused	71
5.1 Aparatuur.....	71
5.2 Katsekehad	71
5.3 Katses kasutatavad koormused	72
5.4 Katse temperatuur	72
5.5 Katse kestvus	72
6. Protseduur.....	73
6.1 Katsekehade löikamine	73
6.2 Katsekehade konditsioneerimine	73
6.3 Tõmbeomaduste mõõtmine	73
6.4 Roomeomaduste mõõtmine	74
6.5 Mehaaniliste omaduste muutuste määramine	74
7. Raport	77

1. Käsitlusala

Käesolev dokument kirjeldab teede katendite ja geotehniliste ehitiste tugevdamise eesmärgil kasutatavate geovõrkude kiirendatud roomekäitumise hindamise protseduuri.

2. Normiviited

Alljärgnevalt loetletud dokumendid, mille kohta on käesolevas dokumendis esitatud normiviited on kas tervenisti või osaliselt vajalikud antud dokumendi rakendamiseks.

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

EVS EN ISO 10319, Geosynthetics — Wide-width tensile test

ISO 13431, Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behavior

EVS EN ISO 9862, Geosynthetics — Sampling and preparation of test specimens

ASTM D6992:2003, Standard test method for accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using isothermal method

3. Terminid, definitsioonid, lühendid ja sümbolid

3.1 Definitsioonid

3.1.1

Tehniliselt esinduslik laius

väiksem laius, millel on identsetes katsetingimustes maksimaalse koormuse korral samad tõmbetugevuse/deformatsiooni tunnused laiuseühiku kohta (tõmbetugevus täpsusega $\pm 5\%$ ja deformatsioon täpsusega $\pm 20\%$) ning mille tulemused on mõõdetud vastavalt standardile EN ISO 10319

3.1.2

Vähendusfaktor

tegur (> 1), millega tõmbetugevus läbi jagatakse, et võtta arvesse konkreetseid kasutustingimusi ja tuletada pikaajaline tugevus

3.1.3

Andmeplokkide nihutamine

meetod, mille abil nihutatakse ühte andmekogumit, mis seob ühel kindlal temperatuuril rakendatud koormuse katsekeha purunemise aja logaritmiga, piki aja telge ühe teguri võrra, et see langeks kokku teisel temperatuuril mõõdetud teise andmehulgaga

3.2 Lühendid

SIM	astmeline isothermine meetod (ing. <i>stepped isothermal method</i>)
TRW	tehniliselt esinduslik laius (ing. <i>technically representative width</i>)
TTS	aja-temperatuuri superpositsiooni printsip (ing. <i>time-temperature superposition</i>)

3.3 Sümbolid

A_j	Aja-temperatuuri nihketegur
G, H	Temperatuuri nihke lineaarsuse valideerimisel kasutatavad parameetrid
L_0	Haaratsite vaheline kaugus ehk katsekeha algpikkus (mm)
ΔL	Katsekeha pikenemine (mm) koormuse mõjul võrreldes algse pikkusega L_0

m	Graafiku gradient
n	Roomepurunemiste arv
RF_{CR}	Vähendusfaktor
S_{sq}	Ruutude summa
t	Aeg väljendatuna tundides
t_D	Kasutusiga
t_R	Roomepurunemiseks kulunud aeg tundides
T	Rakendatav koormus protsendina materjali tõmbetugevusest T_B
T_B	Materjali partii tõmbetugevus (laiuse kohta)
x	Abstsiss
$\bar{x}$	x_i keskmine väärtus
x_i	Üksiku punkti abstsiss
y	Ordinaat
y_0	y väärtus ühe tunni möödudes ($\log t = 0$)
$\bar{y}$	y_i keskmine väärtus
y_i	Üksiku punkti ordinaat

4. Sissejuhatus

Geovõrkude kiirendatud roomekäitumise uurimine viiakse läbi vastavalt ISO/TR 20432 juhistele. Mõõdetavaks parameetriks on ekstrapoleerimise teel saadud aeg, mis kulub geovõrgu purunemiseks sellele rakendatud koormuse mõjul.

5. Katsetingimused

5.1 Aparatuur

1. Tõmbemasin, mis on suuteline määrama uuritavate geosünteedide tõmbetugevust vähemalt 10 kN jõuga, mille täpsusaste on 10 N ja mis on sobiv EVS EN ISO 13109 katsete läbiviimiseks
2. Roomekatse rakis, mis koosneb:
 - b. Kambrist – kus on samaaegselt võimalik uurida kuni kolme katsekeha roomekäitumise temperatuurisõltuvust vahemikus 10 °C kuni 60 °C.
 - c. Haaratsitest – katsekehade kindlalt kinni hoidmiseks kogu nende laiuse ulatuses.
 - d. Temperatuuri andurist, täpsusklassiga $\pm 0,1$ °C
 - e. Roomeandurist - katsekeha pikenemise registreerimiseks, täpsusklassiga $\pm 0,1$ mm
 - f. Termostaadist koos temperatuuri kontrolliga, täpsusklassiga ± 1 °C – vajaliku katsetemperatuuri saavutamiseks ja säilitamiseks.
 - g. Koormamissüsteemist – katsekehale ettenähtud koormuse rakendamiseks
 - h. Arvuti eritarkvaraga – kus on näha roome- ja temperatuuri graafikute joonistumine, katsekeha pikenemine (mm) ning hetke temperatuur (°C) kambris.

5.2 Katsekehad

Vastavalt ISO 13431 standardile võib roomekäitumise uurimisel kasutada kitsamaid katsekehi ehk tehniliselt esindusliku laiusega (TRW) katsekehi, eeldusel et täidetud on tingimus, mille kohaselt vastavalt ISO 10319 standardile mõõdetud tõmbetugevused 200 mm laiusel katsekehal ja kitsamal katsekehal ei erine rohkem kui 5% ning deformatsioon maksimaalsel koormusel ei erine rohkem kui 20%. Ainult sel juhul on lubatud kasutada roomekäitumise hindamisel

kitsamaid katsekehi. Vastavad arvutused ja näited on ära toodud standardis ISO 13431 7.peatükis. Tabelis 1 on vastavalt ISO 13431 standardile ära toodud katsekehade mõõtmed ja katsetingimused sõltuvalt geosünteedi tüübist. Katsekehade valmistamise protseduur on ära toodud p. 6.1.

Tabel 1. Katsekehade mõõdud ja katsetingimused

Geosünteed	Katsekeha pikkus	Katsekeha laius	Katsetingimused (Haaratsite vaheline kaugus L_0)
Geovõrgud	Vähemalt 2 tõmbelementi	Vähemalt 3 tõmbelementi	$L_0 \geq 200 \text{ mm}$

5.3 Katses kasutatavad koormused

Vastavalt ISO 13431 standardile viiakse katsed läbi koormustel vahemikus 50% - 65% katsekeha tõmbetugevusest TB, mis on mõõdetud vastavalt EVS EN ISO 10319 standardile.

5.4 Katse temperatuur

Katsed viiakse läbi 10 °C juures, mis on Eesti keskmine maapinna temperatuur aasta lõikes alates 10 m sügavusel. Temperatuuril 20 °C, millest kõrgemale temperatuur 1 kuni 10 m sügavusel ei tõuse ning protsessi kiirendamise eesmärgil kõrgematel temperatuuridel 40 °C ning 60 °C, sest temperatuuri tõustes roome kiirus kasvab. Neljal erineval temperatuuri katsete läbiviimine võimaldab tulemuste ekstrapoleerimist pikemale perioodile.

5.5 Katse kestvus

Lähtuvalt ISO/TR 20432 standardist tuleb materjali roomekäitumise kiirendatud hindamiseks testida vähemalt 12 katsekeha erinevates ajavahemikes, millest:

- 6 katsekeha tulemused on saadud tavapärasel katsetusel ning mille puhul on koormused valitud nii, et saaks määrata vähemalt neli katsepunkti vahemikus 100 ja 10 000 tundi ning vähemalt ühe 10 000 tundi või enam.
- 6 katsekeha tulemused, mis on saadud nii tavapärasel kui ka kiirendatud katsetustel ning mida on deformatsioonikõveral nihutatud nii, et vähemalt kolm punkti on moodustatud peakõveral ajavahemikus 1 000 ja 100 000 tundi ning kolm punkti ajavahemikus 100 000 ja 10 000 000 tundi.

Tavapärase ehk klassikalise meetodi puhul viiakse katsetused läbi erinevate koormustega kasutustemperatuuril. Kiirendatud meetodi puhul kasutatakse aja-temperatuuri superpositsiooni printsiipi (TTS= time-temperature superposition), mille kohaselt tuleb mõõta roome deformatsiooni ajalist sõltuvust erinevatel temperatuuridel samade koormuste juures ning seejärel nihutada saadud tulemusi pikemate ajaperioodide suunas, moodustades peakõvera, mis võimaldab ennustada geosünteedi kasutusea pikkust.

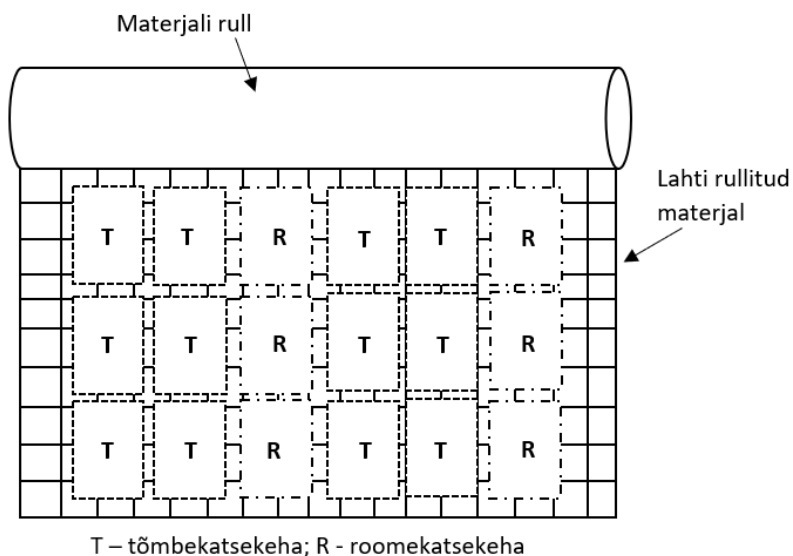
Kuna ekstrapoleerimisel aja-temperatuuri superpositsiooni meetodil tuleb algse deformatsiooni tulemuste hajuvuse tõttu kontrollida nende õigsust korduvate katsetega, siis hajuvuse vähendamiseks on kiirendatud meetodina võimalik kasutada ka vastavalt standardile ASTM D6992:2003 astmelist isotermilist meetodit (SIM= stepped isothermal method), mille puhul testitakse ühte katsekeha temperatuuri astmeliselt tõstes. SIM meetodil saadud tulemused peavad siiski olema kokkusobivad TTS meetodi tulemustega. Lisaks on soovitatav kasutada SIM meetodit pigem kootud ja keevitatud geosünteedide puhul nende kindlas suunas

orienteerituse tõttu ning mitte soovitatav kasutada ekstrusioon põhimõttel toodetud geosünteedide puhul varieeruva orientatsiooni tõttu.

6. Protseduur

6.1 Katsekehade lõikamine

Katsekehad valmistatakse vastavalt EVS EN ISO 9862 standardile. Vastavalt ISO/TR 20432 standardile, tuleb tõmbe- ja roomeomaduste mõõtmisel kasutada katsekehi, mis on võetud samast materjali partiist. Sellest tulenevalt võetakse katsekehad tõmbe- või roomekatseteks materjali rullist samast pikisuunalisest positsioonist kogu rulli laiuse ulatuses vaheldumisi mustriga 2 tõmbe-, 1 roomekatsekeha (joonis 1). Katsekehade täpsemad mõõtmised tõmbetugevuse katsetusteks on ära toodud EVS EN ISO 10319 standardis ja roomekatsetusteks tabelis 1.



Joonis 3. Mustriskeem tõmbe- ja roomekatsetusteks vajalike katsekehade lõikamiseks.

6.2 Katsekehade konditsioneerimine

Vastavalt ISO 13431 standardile tuleb katsekehi enne tõmbe- ja roomekatseid konditsioneerida planeeritaval katsetemperatuuril koormust rakendamata. Katsekehad võib lugeda konditsioneerituks, kui nende massi muutus järjestikuste kaalumiste järel ei ületa 0,25% katsekeha massist. Kaalumisi tuleb teha kindla intervalli tagant, aga mitte vähem kui iga 2 tunni tagant. Katsekehade konditsioneerimise võib ära jätta, kui on olemas tulemused, mis näitavad, et sama tüüpi toodet (nii struktuuri kui ka polümeeri poolest) ei mõjuta temperatuuri ega niiskuse muutused vastavates piirides.

6.3 Tõmbeomaduste mõõtmine

ISO 13431 standard näeb ette, et kõigepealt tuleb vastavalt EVS EN ISO 10319 standardile määrata katsekeha tõmbetugevus TB maksimaalsel koormusel rakenduses mõjuvate jõudude suunas. Kui roomekäitumise uurimisel kasutatakse kitsamaid, alla 200 mm katsekehi, siis on vajalik tõmbekatsed läbi viia nii 200 mm katsekeha kui ka kitsama katsekehaga ning veenduda, et saadud tulemused vastavad p. 5.2 ära toodud tingimustele. Kui roomekäitumise uurimisel kasutatakse erinevaid temperatuure, siis tuleb katsekehade tõmbetugevust mõõta ka vastavatel

temperatuuridel. Roomeomaduste mõõtmisel rakendatavad koormused arvutatakse p. 5.3 ära toodud vastavate protsentidena katsekeha tõmbetugevusest T_B konkreetsel temperatuuril.

6.4 Roomeomaduste mõõtmine

Järgmisena tuleb roomekatsekeha kinnitada haaratsite vahele, sealjuures veendudes, et see on paigutatud täpselt keskele. Katsekeha tuleb testida rakenduses mõjuvate jõudude suunas. Seejärel tuleb protokollida algne haaratsite vahelise kaugus L_0 ning maksimaalselt ühe minuti jooksul ühtlasel kiirusel kohaldada katsekehale koormus. Roomekatse alguseks loetakse hetke mil kogu koormus on katsekehale rakendunud.

Edaspidi tuleb mitte enam kui 3 päeva tagant protokollida katsekeha pikenemine ΔL , selleks kulunud aeg t ning temperatuur kambris. Katsekeha purunemisel protokollida roomepurunemiseks kulunud aeg t_R ja koht, kust katsekeha purunes (haaratsite juurest, keskelt jne).

6.5 Mehaaniliste omaduste muutuste määramine

Kuna vastavalt ISO/TR 20432 standardile tuleb kiirendatud meetodi kasutamisel teatud arv katseid läbi viia ka tavapärasel meetodil, siis tuleb lineaarse regressiooni analüüs teha mõlema meetodi puhul saadud tulemustele eraldi.

Tavapärasel meetodil saadud tulemuste põhjal tuleb koostada roomepurunemise kõver, kus väljendatakse roomekatset rakendatavat koormust T protsendina materjali tõmbetugevusest T_B (y-telg) ning esitatakse sõltuvusena aja logaritmilisest väärtusest $\log t_R$ (x-telg), mis kulub purunemiseks. Illustreeriv näide joonisel 1. Saadud poollogaritmiline graafik peab olema lineaarne. Kui ei ole, siis tuleb ka y-teljel kasutada logaritmilist esitust ehk $y = \log T$ ning saadakse topelt-logaritmiline graafik.

Saadud graafikule regressioonijoone leidmiseks on valem järgmine:

$$x = \bar{x} + m(y - \bar{y}) \quad (1)$$

kus $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ (3) ja $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$ (4)

n – roomepurunemise andmepunktide, mis on tähistatud kui (x_i, y_i) , kogusumma

m – graafiku gradient, mis arvutatakse valemiga $m = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$ (5)

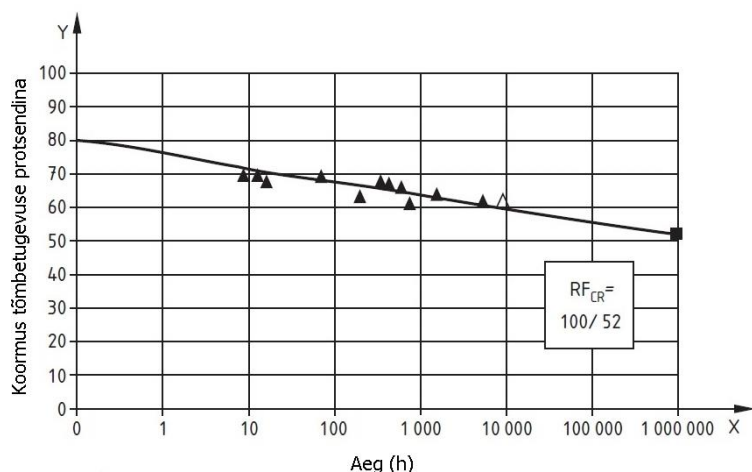
Kõvera tõus poollogaritmilise graafiku puhul peab olema negatiivne ning väljendatud protsendina tõmbetugevusest aastakümne kohta. Topelt-logaritmilise graafiku puhul on tõus võrdne $1/m$.

Kõvera lõikepunkt y-teljega ehk y_0 (kui $x=0$) leitakse valemiga $y_0 = \bar{y} - \bar{x}/m$ (6).

Järgmise sammuna leitakse lähendusjoonel T väärtus kasutusea lõppu tähistaval ajahetkel t_D ja arvutatakse vähendusfaktor RF_{CR} :

$$RF_{CR} = \frac{100}{T} \quad (7)$$

Joonisel 1 oleva näite puhul $T = 52\%$ ehk $RF_{CR} = 1,92$.



Joonis 1. Roomepurunemise punktid leitud regressioonijoonega

Kiirendatud meetodil ehk kõrgendatud temperatuuridel T_j saadud tulemuste põhjal tuleb sarnaselt tavapärasel meetodil saadud tulemuste põhjal koostada roomepurunemise kõver, kus esitatakse leitud roomepurunemise aja sõltuvus rakendatud jõust vastavatel katsetemperatuuridel T_j . Kasutades andmeplokkide nihutamise meetodit tuleb igale katsetemperatuurile T_j määrata nominaalne nihketegur A_j ning konstantidele y_0 ja m nominaalväärtused.

Seejärel tuleb graafikule kanda võrdlustemperatuuri (üldjuhul 20 °C) andmepunktid, mille puhul $A_j=0$ ning mõõdetud t_R logaritmvaartusele tuleb lisada nihketegur ehk $x_i = \log t_R + A_j$ (8).

Iga y_i väärtuse jaoks tuleb arvutada ennustatav purunemisaja logaritmvaartus $x_p = (y_i - y_0)m$ (9) ning iga väärtusepaari jaoks tuleb leida üksliikme vahe ruut ehk $(x_i - x_p)^2$ (10).

Järgmisena tuleb tuletada ruutude summa $S_{sq} = \sum_i (x_i - x_p)^2$ (11) ning kasutatava arvutustabeli optimeerimisprogrammi kasutades tuleb vähendada tuletatud ruutude summat A_j , y_0 ja m funktsioonina.

Seejärel koostada andmepunktide y_i ja x_i vahelise sõltuvuse graafik, kus regressioonijoon on leitud sarnaselt tavapärasel meetodil saadud tulemuste analüüsiga, kasutades valemeid (1) kuni (7).

Andmeplokkide nihutamise viimase sammuna tuleb esitada nihketeguri A_j ja temperatuuri T_j vaheline sõltuvus ning kontrollida kas sirge läbib punkti kus võrdlustemperatuur võrdub nulliga. Peakõvera leidmiseks peavad erinevatel temperatuuridel saadud lähendusjooned olema sirged või kergelt kõverdunud selliselt, et valemi (12) põhjal saadud tulemus täidab tingimust $-0,003 < G/H < 0,003$.

$$A_j = G(T_j - 20) + H(T_j - 20)^2 \quad (12)$$

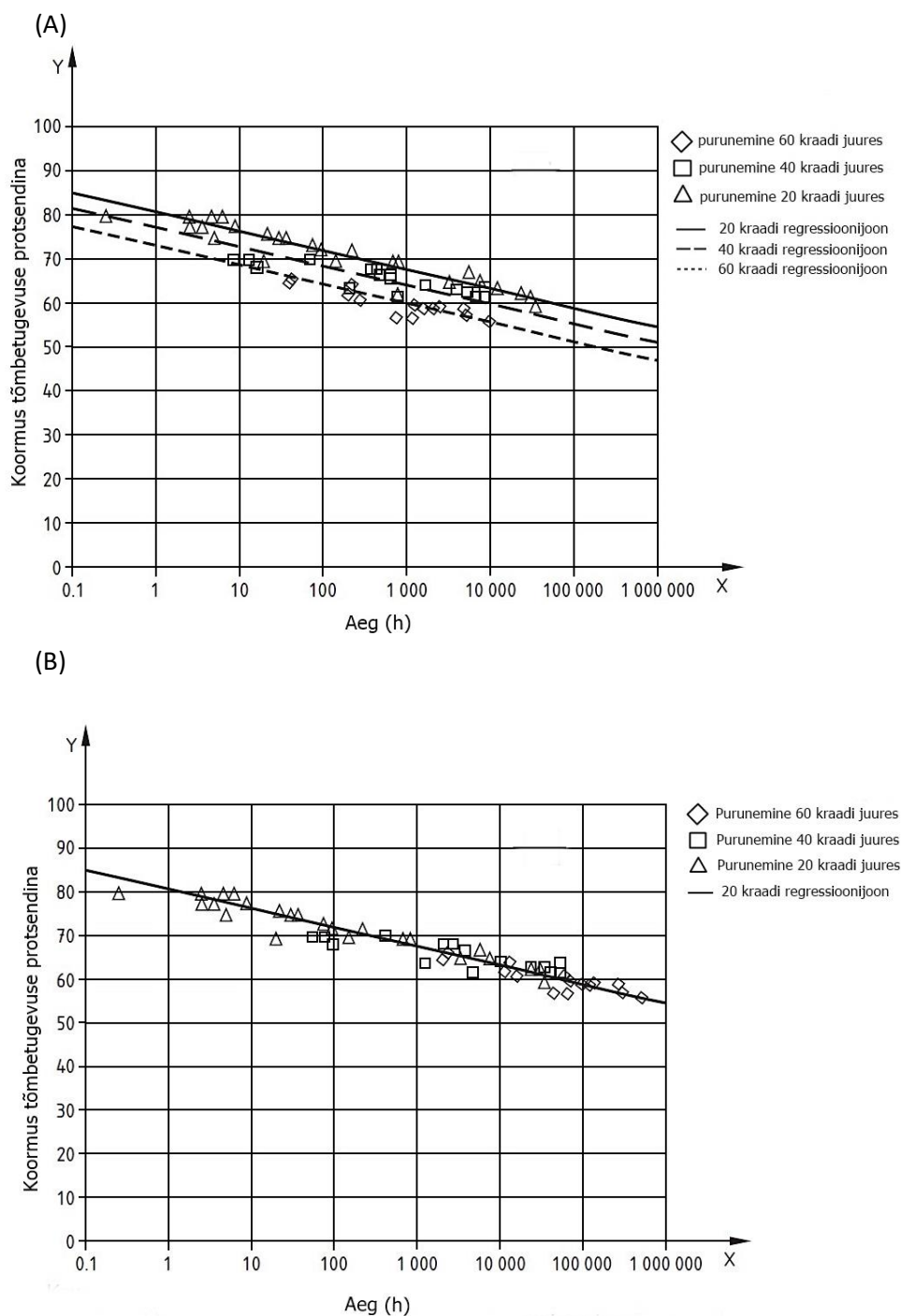
kus G ja H on temperatuuri nihke lineaarsuse valideerimisel kasutatavad parameetrid.

Joonisel 2 on näide andmeplokkide nihutamisest.

Joonisel 2(A) on näha roomepurunemise regressioonijooni ja nendega seotud punkte 20, 40 ja 60 °C juures ning joonisel 2(B) on 40 ja 60 °C jooni ning nendega seotud punkte nihutatud paremale, kuni need kattuvad 20 °C joonega, moodustades sellele pikenduse.

Kui regressioonianalüüs tavapärase ja kiirendatud katsetuste tulemuste põhjal on eraldi läbi viidud, siis tuleb võrrelda leitud RFCR väärtusi, nimelt ei tohi tavapärase meetodiga leitud

RF_{CR} väärtus 2000 tunni juures erineva kiirendatud meetodil leitud RF_{CR} väärtusest 2000 tunni juures enam kui 0,15 võrra. Ka ei tohi 10 000 tunni juures erinevus olla enam kui 0,15. SIM meetodit võib kasutada juhul, kui need tingimused on täidetud. Vastasel juhul tuleb kasutada tavapäraseid meetodeid.



Joonis 2. (A) Roomepurunemise regressioonijooned ning neile vastavad punktid 20, 40 ja 60°C juures. (B) 20°C regressioonijoon suunas nihutatud 40°C ja 60°C regressioonijooned ning nende punktid. [allikas: ISO/TR 20432]

7. Raport

Katse raport peab sisaldama:

- Viidet käesolevale dokumendile;
- Kliendi nime;
- Töövõtja nime;
- Katsetatud materjalide kirjeldust, sh nende iseloomulikke omadusi (polümeerne koostis ja lisaainete kogused);
- Viidet katsekehade võtmise aruandele, kus on määratletud katsekehade võtmise asukoht jm oluline katse tulemust mõjutada võiv teave;
- Kasutatud aparatuur ning nende mõõtmisparameetrid;
- Katsetatavate ühikute arvu;
- Katse kuupäeva;
- Kasutatud temperatuure;
- Võimalike kõrvalekaldeid protseduurist või muidu faktoreid, mis võivad tulemusi mõjutada;
- Katsetulemusi ja järeldusi;

Protseduur geovõrkude roomekätumise hindamiseks kombineerituna keemilise vanandamisega

KOOSTAJAD:

MERIT RIKKO
ANDRES KRUMME

Sisukord

Sisukord.....	79
1. Käsitusala	80
2. Normiviited	80
3. Terminid, definitsioonid, lühendid ja sümbolid	80
3.1 Definitsioonid.....	80
3.2 Lühendid	80
3.3 Sümbolid	80
4. Sissejuhatus	81
5. Katsetingimused	81
5.1 Aparatuur.....	81
5.2 Katses kasutatavad koormused	81
5.3 Vanandamise keskkond	81
5.4 Katse temperatuur	81
5.5 Katse kestvus	82
5.4 Katsekehad	82
6. Protseduur.....	82
6.1 Tõmbeomaduste mõõtmine	82
6.2 Roomeomaduste ja keemilise vastupidavuse kombineeritud mõõtmine	83
6.3 Mehaaniliste omaduste muutuste määramine	83
7. Raport	83

1. Käsitlusala

Käesolev dokument kirjeldab geosünteedide roomekäitumise hindamise ja kiirendatud keemilise vastupidavuse kombineeritud protseduuri, sealjuures lähtudes võimalikest ohuallikates keskkonnas kuhu geovõrk paigaldatakse teede või raudteede konstruktsiooni või erinevatesse geotehnilisse konstruktsioonidesse mida tugevdatakse geosünteedidega.

2. Normiviited

Alljärgnevalt loetletud dokumendid, mille kohta on käesolevas dokumendis esitatud normiviited on kas tervenisti või osaliselt vajalikud antud dokumendi rakendamiseks.

„Geosünteedide kiirendatud keemilise vanandamise protseduur“ Tallinna Tehnikaülikooli Polümeeride ja Tekstiilitehnoloogia laboris väljatöötatud meetoodika

„Geosünteedide roomekäitumise hindamise protseduur“ Tallinna Tehnikaülikooli Polümeeride ja Tekstiilitehnoloogia laboris väljatöötatud meetoodika

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

EVS EN ISO 10319, Geosynthetics — Wide-width tensile test

ISO 13431, Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behavior

EVS EN ISO 12960, Geotextiles and geotextile-related products – Screening test method for determining the resistance to liquids [acids and alkalis]

EVS EN ISO 9862, Geosynthetics — Sampling and preparation of test specimens

3. Terminid, definitsioonid, lühendid ja sümbolid

3.1 Definitsioonid

3.1.1

tehniliselt esinduslik laius

väiksem laius, millel on identsetes katsetingimustes maksimaalse koormuse korral samad tõmbetugevuse/deformatsiooni tunnused laiuseühiku kohta (tõmbetugevus täpsusega $\pm 5\%$ ja deformatsioon täpsusega $\pm 20\%$) ning mille tulemused on mõõdetud vastavalt standardile EVS EN ISO 10319

3.1.2

Vähendusfaktor

tegur (> 1), millega tõmbetugevus läbi jagatakse, et võtta arvesse konkreetseid kasutustingimusi ja tuletada pikaajaline tugevus

3.2 Lühendid

TRW tehniliselt esinduslik laius (ing. *technically representative width*)

TTS aja-temperatuuri superpositsiooni printsiip (ing. *time-temperature superposition*)

3.3 Sümbolid

L_0 Haaratsite vaheline kaugus ehk katsekeha algpikkus (mm)

ΔL Katsekeha pikenemine (mm) koormuse mõjul võrreldes algse pikkusega L_0

t Aeg väljendatuna tundides

t_R Roomepurunemiseks kulunud aeg tundides

T Rakendatav koormus protsendina materjali tõmbetugevusest T_B

T_B Materjali partii tõmbetugevus (laiuse kohta)

4. Sissejuhatus

Geosünteedide roomekäitumise uurimine kombineerituna keemilise vanandamisega viiakse läbi toetudes Tallinna Tehnikaülikooli Biopolümeeride laboris väljatöötatud protseduuridele „Geosünteedide kiirendatud keemilise vanandamise protseduur“ ning „Geovõrkude kiirendatud roomekäitumise hindamise protseduur“. Mõõdetavaks parameetrik on ekstrapoleerimise teel saadud aeg, mis kulub geosünteedi purunemiseks sellele rakendatud koormuse ja keemilise riskikeskkonna mõjul.

5. Katsetingimused

5.1 Aparatuur

1. Tõmbemasin, mis on suuteline määrama uuritavate geosünteedide tõmbetugevust vähemalt 10 kN jõuga, mille täpsusaste on 10 N ja mis on sobiv EVS ISO EN 10319 katsete läbiviimiseks
2. Roomekatse rakis, mis koosneb:
 - i. Kambrist – kus on samaaegselt võimalik uurida kuni kolme katsekeha roomekäitumise temperatuurisõltuvust vahemikus 10 °C kuni 60 °C.
 - j. Haaratsitest – katsekehade kindlalt kinni hoidmiseks kogu nende laiuse ulatuses.
 - k. Silindrilisest kraaniga anumast – haaratsite vahel oleva katsekeha keemilises riskikeskkonnas hoiustamiseks roomekatse vältel.
 - l. Temperatuuri andurist, täpsusklassiga $\pm 0,1$ °C
 - m. Roomeandurist - katsekeha pikenemise registreerimiseks, täpsusklassiga $\pm 0,1$ mm
 - n. Termostaadist koos temperatuuri kontrolleriiga, täpsusklassiga ± 1 °C – vajaliku katsetemperatuuri saavutamiseks ja säilitamiseks.
 - o. Koormamissüsteemist – katsekehale ettenähtud koormuse rakendamiseks.
 - p. Arvuti eritarkvaraga – kus on näha roome- ja temperatuuri graafikute joonistumine, katsekeha pikenemine (mm) ning hetke temperatuur (°C) kambris.
3. Voolik koos pumbaga – silindrilisse anumasse keemilise riskikeskkonna lahuse pumpamiseks.
4. pH-meeter – keemilise riskikeskkonna pH regulaarseks kontrollimiseks.

5.2 Katses kasutatavad koormused

Vastavalt ISO 13431 standardile viiakse katsed läbi koormustel vahemikus 50% - 65% katsekeha tõmbetugevusest TB, mis on mõõdetud vastavalt EVS ISO EN 10319 standardile.

5.3 Vanandamise keskkond

Lähtudes Eesti oludest ja võimalikest ohuallikatest geovõrkudele, viiakse vanandamise katsed läbi järgnevatel keskkondades:

1. Neutraalne keskkond (võrdluskeskkond);
2. Elektritootmise värske tuha leostusvesi (aluseline keskkond);
3. Rabavesi (happeline keskkond).

5.4 Katse temperatuur

Katsed viiakse läbi standardtemperatuuril 20 °C ning pidades silmas, et nii keemilised reaktsioonid kui ka roome kiirus kasvavad temperatuuri tõustes, siis protsessi kiirendamise

eesmärgil viiakse katsed läbi ka kõrgematel temperatuuridel 40 °C ja 60 °C. Kolmel erineval temperatuuri katsete läbi viimine võimaldab tulemuste ekstrapoleerimist pikemale perioodile. Madalamal temperatuuril kui 20 °C pole mõistlik katseid läbi viia, sest keemilised reaktsioonid ning roome kiirus on aeglasemad ning sellest tulenevalt on nii roome kui keemilise riskikeskkonna mõju hindamise protsess väga aeganõudev. Mida kõrgem on temperatuur seda suurem on oht, et rakendatud koormusel hinnatakse roome mõju asemel hoopis materjali tõmbetugevust ning sellest tulenevalt võib olla saadud tulemuste hajuvus suur. Seetõttu pole mõistlik katseid läbi viia kõrgemal temperatuuril kui 60 °C.

5.5 Katse kestvus

Lähtuvalt ISO/TR 20432 standardist tuleb materjali roomekäitumise kiirendatud hindamiseks testida vähemalt 12 katsekeha erinevates ajavahemikes, millest:

- 6 katsekeha tulemused on saadud tavapärasel katsetusel ning mille puhul on koormused valitud nii, et saaks määrata vähemalt neli katsepunkti vahemikus 100 ja 10 000 tundi ning vähemalt ühe 10 000 tundi või enam.
- 6 katsekeha tulemused, mis on saadud nii tavapärasel kui ka kiirendatud katsetustel ning mida on deformatsioonikõveral nihutatud nii, et vähemalt kolm punkti on moodustatud peakõveral ajavahemikus 1 000 ja 100 000 tundi ning kolm punkti ajavahemikus 100 000 ja 10 000 000 tundi.

Tavapärase ehk klassikalise meetodi puhul viiakse katsetused läbi erinevate koormustega kasutustemperatuuril. Kiirendatud meetodi puhul kasutatakse aja-temperatuuri superpositsiooni printsiipi (TTS= time-temperature superposition), mille kohaselt tuleb mõõta roomedeformatsiooni ajalist sõltuvust erinevatel temperatuuridel samade koormuste juures ning seejärel nihutada saadud tulemusi pikemate ajaperioodide suunas, moodustades peakõvera, mis võimaldab ennustada geosünteedi kasutusea pikkust. Ekstrapoleerimisel aja-temperatuuri superpositsiooni meetodil tuleb algse deformatsiooni tulemuste hajuvuse tõttu kontrollida nende õigsust korduvate katsetega.

5.6 Katsekehad

Antud katsetustes kasutatavad katsekehad on valmistatakse samamoodi ning on samade mõõtmetega nagu kirjeldatud „Geosünteedide roomekäitumise hindamise protseduuris“ p. 5.4 ja p. 6.1.

6. Protseduur

6.1 Tõmbeomaduste mõõtmine

ISO 13431 standard näeb ette, et enne roomeomaduste mõõtmist tuleb kõigepealt vastavalt EVS EN ISO 10319 standardile määrata katsekeha tõmbetugevus T_B maksimaalsel koormusel rakenduses mõjuvate jõudude suunas. Selleks tuleb katsekehi enne tõmbeomaduste mõõtmist konditsioneerida planeeritaval katsetemperatuuril koormust rakendamata. Katsekehad võib lugeda konditsioneerituks, kui nende massi muutus järjestikuste kaalumiste järel ei ületa 0,25% katsekeha massist. Kaalumisi tuleb teha kindla intervalli tagant, aga mitte vähem kui iga 2 tunni tagant. Katsekehade konditsioneerimise võib ära jätta, kui on olemas tulemused, mis näitavad, et sama tüüpi toodet (nii struktuuri kui ka polümeeri poolest) ei mõjuta temperatuuri ega niiskuse muutused vastavates piirides.

Kui roomekäitumise uurimisel kasutatakse tehniliselt esindusliku laiusega (TRW) ehk kitsamaid, alla 200 mm katsekehi, siis on vajalik tõmbekatsed läbi viia nii 200 mm katsekeha kui ka kitsama katsekehaga ning veenduda, et antud katsekehade tõmbetugevused ei erine

rohkem kui 5% ning deformatsioon maksimaalsel koormusel ei erine rohkem kui 20%. Kuna roomekäitumise uurimisel kasutatakse erinevaid temperatuure, siis tuleb katsekehade tõmbetugevust mõõta ka vastavatel temperatuuridel. Roomeomaduste mõõtmisel rakendatavad koormused arvutatakse p. 5.2 ära toodud vastavate protsentidena katsekeha tõmbetugevusest T_B konkreetse temperatuuril.

6.2 Roomeomaduste ja keemilise vastupidavuse kombineeritud mõõtmine

Kõigepealt tuleb roomekatsekeha kinnitada haaratsite vahele, sealjuures veendudes, et see on paigutatud täpselt keskele. Katsekeha tuleb testida rakenduses mõjuvate jõudude suunas. Seejärel tuleb protokollida algne haaratsite vahelise kaugus L_0 ning katsekeha ümber paigaldatavasse silindrilisse anumasse valada keemilise riskikeskkonna vesilahus. Vastavalt EVS EN 12960 standardile peab keemilise vanandamise lahuse kaal olema 30 korda suurem kui katsekeha kaal ning lahus peab katma katsekeha nii, et katsekeha ja vedeliku pinna vaheline distant on vähemalt 10 mm. Enne katsekehale koormuse rakendamist on vajalik katsekeha konditsioneerida vastaval katsetemperatuuril minimaalselt 24 tundi. Pärast konditsioneerimist tuleb katsekehale maksimaalselt ühe minuti jooksul ühtlasel kiirusel kohaldada koormus. Katse alguseks loetakse hetke mil kogu koormus on katsekehale rakendunud.

Edaspidi tuleb mitte enam kui 3 päeva tagant protokollida katsekeha pikenemine ΔL , selleks kulunud aeg t ning temperatuur kambris. Lahuse pH-d tuleb mõõta ja protokollida vähemalt igal seitsmendal päeval ning vajadusel algse pH säilitamiseks asendada lahus uuega, mis on eelnevalt kuumutatud katsetemperatuurile. Katsetulemuste õigsuse ja eelkõige ohutuse tagamiseks katsekeha ootamatul purunemisel, tuleb pH kontrollimiseks võtta silindrilisest anumast väiksem lahuse kogus selliselt, et katsekeha jääb puutumata, kasutades selleks näiteks anuma alaosas paigaldatud kraani. Lahuse asendamisel tuleb anum eelneva lahusega tühjendada samuti kasutades kraani ning asendada uuega, pumbades seda läbi vooliku tagasi silindrilisse anumasse. Sealjuures veendudes, et voolikust tuleva lahuse juga ei oleks otseselt suunatud katsekehale.

Katsekeha purunemisel protokollida roomepurunemiseks kulunud aeg t_R ja koht, kust katsekeha purunes (haaratsite juurest, keskelt jne).

6.3 Mehaaniliste omaduste muutuste määramine

Esmane katsetulemuste regressioonanalüüs, vähendusfaktorite leidmine ja ekstrapoleerimine pikemale perioodile tuleb läbi viia sarnaselt „Geosünteedide roomekäitumise hindamise protseduuris“ p. 6.4 kirjeldatud viisil. Keemilise vastupidavuse hindamiseks tuleb saadud tulemusi võrrelda samadel katsetingimustel, kuid ilma keemilise vanandamise keskkonnata läbiviidud roomekäitumise uurimise katsetulemustega.

7. Raport

Katse raport peab sisaldama:

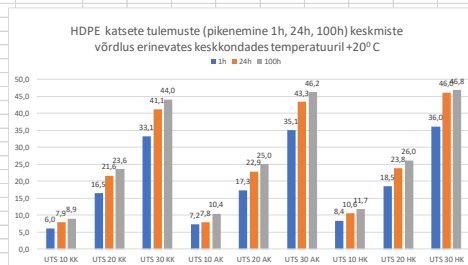
- Viidet käesolevale dokumendile;
- Kliendi nime;
- Töövõtja nime;
- Katsetatud materjalide kirjeldust, sh nende iseloomulikke omadusi (polümeerne koostis ja lisaainete kogused);
- Viidet katsekehade võtmise aruandele, kus on määratletud katsekehade võtmise asukoht jm oluline katse tulemust mõjutada võiv teave;
- Kasutatud aparatuur ning nende mõõtmisparameetrid;
- Katse keskkonda;

- Katsetatavate ühikute arvu;
- Katse kuupäeva;
- Kasutatud temperatuure;
- Võimalike kõrvalekaldeid protseduurist või muidu faktoreid, mis võivad tulemusi mõjutada;
- Katsetulemusi ja järeldusi;

LISA 5 Roomekatse tulemuste detailne analüüs



HDPE kombineeritud katsed, temperatuur +20, mm												
	UTS 10			UTS 20			UTS 30					
	katse algusest			katse algusest			katse algusest					
	1h	24h	100h	1h	24h	100h	1h	24h	100h			
kontroll-keskkond	6,5	8,5	9,6	17,4	22,7	24,6	35,1	42,8	45,7			
	5,6	7,5	8,6	15,5	20,5	22,5	32	40	42,9			
	5,9	7,6	8,6	16,5	21,6	23,7	32,2	40,4	43,3			
	ST.DEV	0,46	0,55	0,58	0,95	1,10	1,05	1,73	1,51	1,51		
aluseline tuhalahus	6,9	9	10,1	16,8	22,5	24,4	34	42,2	45,1			
	7,5	6,6	10,7	17,8	23,2	25,5	36,1	44,4	47,3			
	0,42	1,70	0,42	0,71	0,49	0,78	1,48	1,56	1,56			
	ST.DEV											
happeline - rabavesi	8	11	12,1	18,5	23,8	26	36	46	46,8			
	8,8	10,1	11,3									
	0,57	0,64	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
	ST.DEV											
keskkondade ST.DEV	1,15	1,55	1,33	1,05	1,18	1,26	1,82	2,31	1,80			
	95 tšenniosus	2,30	3,10	2,65	2,11	2,36	2,51	3,64	4,61	3,59		
	max	8,8	11	12,1	18,5	23,8	26	36,1	46	47,3		
	min	5,6	6,6	8,6	15,5	20,5	22,5	32	40	42,9		
Standardhälbed												
Keskond	UTS	1h	24h	100h	1h	24h	100h					
Kontroll-keskkond UTS 10 KK		6,0	7,9	8,9		0,46	0,55	0,58				
Kontroll-keskkond UTS 20 KK		16,5	21,6	23,6		0,95	1,10	1,05				
Kontroll-keskkond UTS 30 KK		33,1	41,1	44,0		1,73	1,51	1,51				
Aluseline tuhal UTS 10 AK		7,2	7,8	10,4		0,42	1,70	0,42				
Aluseline tuhal UTS 20 AK		17,3	22,9	25,0		0,71	0,49	0,78				
Aluseline tuhal UTS 30 AK		35,1	43,3	46,2		1,48	1,56	1,56				
Happeline raba UTS 10 HK		8,4	10,6	11,7		0,57	0,64	0,57				
Happeline raba UTS 20 HK		18,5	23,8	26,0		0,00	0,00	0,00				
Happeline raba UTS 30 HK		36,0	46,0	46,8		0,00	0,00	0,00				

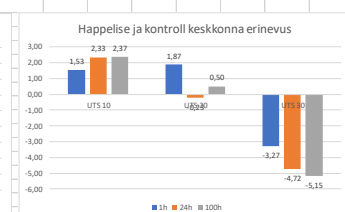
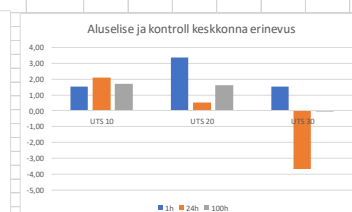
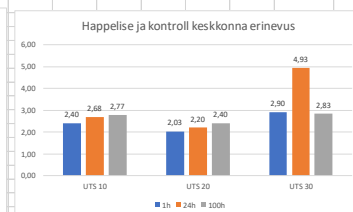
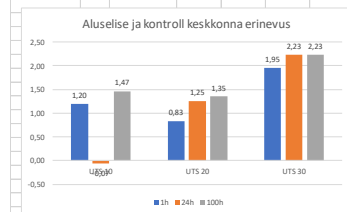


Võrdlus kontroll-keskkonnaga (aluseline vs kontroll keskkond)

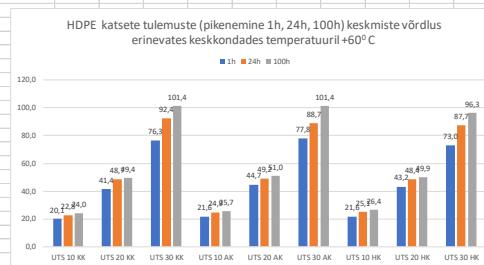
Veerid	1h	24h	100h
UTS 10	1,20	-0,07	1,47
UTS 20	0,83	1,25	1,35
UTS 30	1,95	2,23	2,23

Võrdlus kontroll-keskkonnaga (happeline vs kontroll keskkond)

Veerid	1h	24h	100h
UTS 10	2,40	2,68	2,77
UTS 20	2,03	2,20	2,40
UTS 30	2,90	4,93	2,83



HDPE kombineeritud katsed, temperatuur +60, mm											
	UTS 10			UTS 20			UTS 30				
	katse algusest			katse algusest			katse algusest				
	1h	24h	100h	1h	24h	100h	1h	24h	100h		
kontroll- keskkond	19	22,3	25,4	36,8	50,4	50,6	73,7	89,2	106,2		
	18,4	21	21,3	41,7	45,7	46,9	74,6	91,2	97,4		
	22,9	25	25,4	45,6	49,9	50,6	80,5	96,7	100,6		
ST.DEV	2,44	2,04	2,37	4,41	2,58	2,14	3,69	3,88	4,45		
aluseline tuhalahus	22,2	25,4	26,3	44,4	48,9	50,6	73,5	84,4	105,7		
	21,7	25	25,8	45,1	49,5	51,3	80,5	85,4	92,5		
	21	24,2	25,1	44,7	49,2	51,4	79,4	95,3	100,6		
ST.DEV	0,60	0,61	0,60	0,35	0,30	0,36	3,76	6,60	7,68		
happeline - rabavesi	21,6	25,1	26,2	42,9	47,8	47,8	73,1	87,6	95,6		
	22,1	25,5	26,6	43,8	49,5	51,8	73,1	87,6	95,6		
	21,2	24,7	24,7	43	48	50	72,9	87,7	96,9		
ST.DEV	0,45	0,40	0,20	0,49	0,93	2,00	0,14	0,07	0,92		
ST.DEV	1,49	1,55	1,68	2,66	1,42	1,64	3,46	4,63	5,32		
	2,98	3,11	3,36	5,32	2,84	3,29	6,91	9,26	10,56		
	22,9	25,5	26,6	45,6	50,4	51,8	80,5	96,7	106,2		
	18,4	21	21,3	36,8	45,7	46,9	72,9	85,4	92,5		
Standardhälbed											
keskkond	UTS	1h	24h	100h	1h	24h	100h				
Kontroll-kesi UTS 10 KK		20,1	22,8	24,0		2,44	2,04	2,37			
Kontroll-kesi UTS 20 KK		41,4	48,7	49,4		4,41	2,58	2,14			
Kontroll-kesi UTS 30 KK		76,3	92,4	101,4		3,69	3,88	4,45			
Aluseline tuht UTS 10 AK		21,6	24,9	25,7		0,60	0,61	0,60			
Aluseline tuht UTS 20 AK		44,7	49,2	51,0		0,35	0,30	0,36			
Aluseline tuht UTS 30 AK		77,8	88,7	101,4		3,76	6,60	7,68			
Happeline raba UTS 10 HK		21,6	25,1	26,4		0,45	0,40	0,20			
Happeline raba UTS 20 HK		43,2	48,4	49,9		0,49	0,93	2,00			
Happeline raba UTS 30 HK		73,0	87,7	96,3		0,14	0,07	0,92			



Võrdlus kontroll-keskkonnaga (aluseline vs kontroll keskkond)

Veerid	1h	24h	100h
UTS 10	1,53	2,10	1,70
UTS 20	3,37	0,53	1,63
UTS 30	1,53	-3,67	-0,03

Võrdlus kontroll-keskkonnaga (happeline vs kontroll keskkond)

Veerid	1h	24h	100h
UTS 10	2,40	2,68	2,77
UTS 20	1,87	-0,23	0,50
UTS 30	-3,27	-4,72	-5,15