TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

# LIIKLUSVIITADE LOETAVUSE PROBLEEM EESTIS KIRJATÜÜBI JA ÜLEKIIRGAMISE KONTEKSTIS

# READABILITY PROBLEMS OF ESTONIAN TRAFFIC SIGNS IN THE CONTEXT OF TYPEFACE AND IRRADIATION EFFECTS

Magistritöö

Üliõpilane: Silver Sepp
Üliõpilaskood: 207034EATI
Juhendaja: Luule Kaal, lektor
Kaasjuhendaja: Raul Vibo, Volitatud teedeinsener, tase 8

Tallinn 2026

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

/ kuupäev digiallkirjas /

Autor: Silver Sepp

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

/ kuupäev digiallkirjas /

Juhendaja: Luule Kaal

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

/ kuupäev digiallkirjas /

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

# LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS[1]

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Silver Sepp,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Liiklusviitade loetavuse probleem Eestis kirjatüübi ja ülekiirgamise kontekstis, mille juhendaja on Luule Kaal ja kaasjuhendaja Raul Vibo,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Click or tap to enter a date.

*[1] Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.*

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Ehituse ja arhitektuuri instituut

**Üliõpilane**: Silver Sepp, 207034EATI

Õppekava, peaeriala: EATI 02/17 – Teedeehitus ja geodeesia

Juhendaja(d): Luule Kaal, lektor

Konsultant: Raul Vibo, liiklusohutuse audiitor

**Lõputöö teema**:

**Liiklusviitade loetavuse probleem Eestis kirjatüübi ja ülekiirgamise kontekstis**

Readability Problems of Estonian Traffic Signs in the Context of Typeface and Irradiation Effects

**Lõputöö põhieesmärgid**:

1. Analüüsida Eesti teeviitade loetavuse probleeme, kas hetkel kehtiv standard tagab optimaalse loetavuse mesoopilistes tingimustes
2. Võrrelda Eestis kasutatavat teeviida kirjatüüpi teiste riikide standardite ja praktikaga
3. Teostada praktilisi visuaalseid simulatsioone eesmärgiga leida teeviitadel kasutamiseks sobivad kirjatüübid kõrge intensiivsusega retroreflektiivse kile kombinatsioonis
4. Tuvastada Eesti tänase standardi puudusi teeviitade loetavuse seisukohalt eesmärgiga parandada info tajumist ja liiklusohutust ning esitada ettepanekuid standardi korrigeerimiseks

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

| Nr | Ülesande kirjeldus | Tähtaeg |
|---|---|---|
| 1. | Teema valik ja taustainfo kogumine | 12.02.2026 |
| 2. | Teoreetilise osa kirjutamine | 18.04.2026 |
| 3. | 75% tööst valmis ja eelkaitsmine | 27.04.2026 |
| 4. | Lõputöö valmis esitamiseks retsensendile | 25.05.2026 |

**Töö keel:** Eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 27.05.2026

**Üliõpilane:** Silver Sepp ..... "26"mai.2026.a
/allkiri/

**Juhendaja:** Luule Kaal ..... "26"mai.2026.a
/allkiri/

**Kaasjuhendaja:** Raul Vibo ..... "26"mai.2026.a
/allkiri/

**Programmijuht:** Mihkel Kask ..... "26"mai.2026.a
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA ..... 7
SISSEJUHATUS ..... 8
1. TEOREETILINE OSA ..... 9
1.1 Inimese visuaalne taju liikluskeskkonnas ..... 9
1.1.1 Inimsilma ehitus ja nägemise alused ..... 9
1.1.2 Skotoopiline, mesoopiline ja fotoopiline nägemine ..... 10
1.1.3 Nägemise muutused vanuse ja valgustingimustega ..... 13
1.1.4 Kontrasti, pimestuse ja valguse hajumise mõju visuaalsele tajule ..... 15
1.1.5 Pilguliikumine ja vaateväli ..... 19
1.1.6 Loetavuskaugus ja reaktsiooniaeg liikluses ..... 20
1.1.7 Teeviitade loetavuse mõju liiklusohutusele ..... 21
1.2 Valguse füüsika ja retroreflektsioon ..... 23
1.2.1 Valguse omadused liikluskeskkonnas ..... 23
1.2.2 Retrorefleksioon ja liiklusmärkide materjalid ..... 26
1.2.3 Retroreflektsiooni geomeetria ..... 28
1.2.4 Retroreflektiivsed mõõdikud ..... 29
1.2.5 Kõrge intensiivsusega (HI) kile mõju visuaalsele tajule ja loetavusele ..... 32
1.3 Liiklusviitade visuaalne disain ..... 36
1.3.1 Tüpograafia alused ..... 36
1.3.2 Kirjatüübid liikluskeskkonnas ..... 40
1.3.3 Tähe- ja reavahed ..... 43
1.3.4 Viitade paigutus ..... 44
1.3.5 Eesti standardi analüüs ..... 46
2. PRAKTILINE OSA ..... 49
2.1 Metoodika eesmärk ..... 49
2.2 Kasutatav meetod ..... 49
2.3 Visuaalse simulatsiooni teostus ..... 50
2.4 Visuaalse simulatsiooni tulemused ja võrdlev analüüs ..... 51
KOKKUVÕTE ..... 57
SUMMARY ..... 59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU ..... 61

# EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teemani jõudsin tänu Tallinna Tehnikaülikooli teede ehituse ja geodeesia õppekava programmijuhile Mihkel Kask. Töö teema algidee on pakkunud välja liiklusohutuse audiitor Raul Vibo. Töö on koostatud Tallinnas.

Lõputöö teema keskmeks on Eesti teeviitade loetavuse probleem. Töös käsitletakse valguse füüsika omadusi, inimsilma nägemisfüsioloogiat ja teeviitade visuaalse disaini aspekte, sealhulgas tekstitüüp. Töö eesmärk on analüüsida kehtiva lahenduse sobivust ja esitada ettepanekuid loetavuse parandamiseks.

Soovin tänada oma juhendajat Luule Kaal ja kaasjuhendajat Raul Vibo, kes aitasid kaasa mõelda ja toetasid lõputöö valmimist. Samuti kuuluvad tänusõnad ka programmijuhile Mihkel Kask, kes aitas teema ja juhendajate leidmisega.

Loodetavasti annab käesolev lõputöö sisendi Eesti teeviitade nähtavuse ja loetavuse edasiseks arendamiseks ning toetab tulevikus võimalikke täiendusi standardites.

**Võtmesõnad:** teedeehitus, teeviitade loetavus, valguse füüsika, retroreflektsioon, peegelduvus (cd/lx/m2), nägemisfüsioloogia.

# SISSEJUHATUS

Teeviitade loetavus on oluline tegur nii liiklusohutuse kui ka sõidukijuhi ruumilise orienteerumise seisukohalt. Liiklusmärgid ja suunaviidad ei täida üksnes informatiivset rolli, vaid on otseselt seotud ohutu liikluskäitumisega, kuna nende kaudu edastatav teave peab jõudma juhini piisava ajavaruga ja arusaadaval kujul. Visuaalne informatsioon peab olema tajutav kiiresti ja üheselt mõistetavalt ka olukordades, kus juhil on piiratud aeg ja tähelepanuressurss.

Eriti keeruliseks muutub visuaalse informatsiooni tajumine hämarates ja öistes tingimustes, kus valgustus on vähene. Sellistes tingimustes on inimese nägemissüsteemi kontrastitundlikkus ja detailide eristusvõime piiratumad, mistõttu võivad visuaalse tajumise puudujäägid oluliselt mõjutada informatsiooni kiiret ja täpset mõistmist.

Kaasaegses liikluskeskkonnas kasutatakse teeviitadel laialdaselt retroreflektiivseid materjale, mille eesmärk on tagada märkide nähtavus sõidukite esitulede valguses. Kuigi suurem retroreflektiivsus parandab märkide märgatavust, võivad väga suure intensiivsusega materjalid teatud tingimustes põhjustada probleeme, vähendada teksti ja sümbolite eristatavust ning mõjutada märgi loetavust, eriti juhul, kui märgi kujundus ei arvesta inimese nägemissüsteemi piirangutega.

Eestis reguleerivad teeviitade ja liiklusmärkide kujundust ning paigutust kehtivad standardid, mille eesmärk on tagada ühtne ja ohutu liikluskorraldus. Samas tõstatub küsimus, kuivõrd vastavad kehtivad lahendused tänapäevastele liiklus- ja valgustingimustele ning inimese nägemissüsteemi tegelikele võimalustele just hämarates ja öistes olukordades. See loob vajaduse analüüsida teeviitade loetavust süsteemselt, tuginedes nägemisteaduslikele ja füüsikalistele alustele.

Käesoleva magistritöö eesmärk on analüüsida teeviitade loetavuse probleeme Eesti liikluskeskkonnas eelkõige pimedal ajal, keskendudes visuaalse taju füsioloogiale, valguse füüsikalistele omadustele ning liiklusmärkide kujunduse põhimõtetele. Töö raames käsitletakse Eestis kasutatava kirjatüübi Arial Narrow Bold mõju teeviitade loetavusele ning hinnatakse selle sobivust kehtivate kasutustingimuste kontekstis.

# 1. TEOREETILINE OSA

## 1.1 Inimese visuaalne taju liikluskeskkonnas

Liikluskeskkonnas toimuv informatsioonivahetus põhineb suurel määral visuaalsel tajul. Sõidukijuhtimine eeldab pidevat visuaalse informatsiooni töötlemist, kuna juht peab liikluses säilitama ruumilise orientatsiooni ja jälgima samaaegselt liiklusmärke, teisi liiklejaid ja teekattemärgistust.[1]

Liiklusmärkide ja teeviitade tajumine on mitmeetapiline protsess, mis hõlmab informatsiooni vastuvõtmist, seejärel selle töötlemist ning seejärel reageerimist. Esmalt peab juht objekti visuaalselt tuvastama, seejärel ära tundma ning tõlgendama selle tähendust ja tegema otsuse, milline tegevus on antud olukorras vajalik. Pärast otsustamist järgneb reaktsioon, kus otsus viiakse ellu näiteks kiiruse muutmise või sõidusuuna korrigeerimise kaudu või jäetakse reageerimata ebaolulise objekti korral. Sõiduki liikumise korral on aeg piiratud, mille jooksul liiklusmärk on juhi vaateväljas nähtav, seega peab kogu see protsess toimuma lühikese ajavahemiku jooksul. Seetõttu ei sõltu liiklusmärkide ja teeviitade tõhusus üksnes nende nähtavusest ja paigutusest, vaid ka juhi võimest visuaalset informatsiooni töödelda ja reageerida.[2]

Käesolevas peatükis autor käsitleb inimsilma talitust ja nägemisfüsioloogia aluseid eesmärgiga seletada, milline visuaalne informatsioon üldse jõuab juhini ja millistes tingimustes võib selle tajumine muutuda raskendatuks või loetamatuks. Keskendutakse erinevatele nägemisrežiimidele, pimestuse mõjule ja nägemise muutustele vananedes.

### 1.1.1 Inimsilma ehitus ja nägemise alused

Inimese nägemissüsteem on keeruline sensoorne süsteem. Nägemine algab hetkest, mil objektidelt peegelduv valgus siseneb silma läbi sarvkesta ja pupilli ning fokuseeritakse läätse abil võrkkestale. Võrkkest on silma sisepinnal paiknev neuronite võrgustik, mis sisaldab fotoretseptorrakke, mis muundavad valgusenergia elektrilisteks signaalideks. Need signaalid edastatakse nägemisnärvi kaudu ajju, kus toimub visuaalse informatsiooni edasine töötlemine ja tõlgendamine.

Võrkkestas eristatakse kahte tüüpi fotoretseptoreid - kepikesi ja kolvikesi. Kolvikesed paiknevad peamiselt võrkkesta keskosas ning vastutavad detailse nägemise ja värvitaju eest. Kepikesed paiknevad enamasti võrkkesta perifeersetes piirkondades ning on tundlikumad madala valgustaseme suhtes, võimaldades nägemist hämarates tingimustes. Samas on kepikeste ruumiline eraldusvõime väiksem kui kolvikestel, mistõttu on hämaras detailide eristamine raskem. Sellest tulenevalt on ka teksti

lugemine madala valgustaseme korral keerulisem võrreldes heade valgustingimustega. Nägemise kvaliteeti mõjutavad lisaks fotoretseptorite jaotusele ka silma optilised omadused ning võrkkesta ja närvisüsteemi võime visuaalset informatsiooni töödelda. Valgustingimused mõjutavad nägemise toimimist, kuna fotoretseptorite tundlikkus ja visuaalne töötlus sõltuvad valguse intensiivsusest. Seetõttu sõltub nägemissüsteemi efektiivne toimimine nii silma füsioloogiast kui ka visuaalse informatsiooni töötlemisest kesknärvisüsteemis.[3]

Nägemise füsioloogiliste mehhanismide mõistmine on oluline liikluskeskkonnas esinevate visuaalsete probleemide analüüsimisel. Liiklusmärkide ja teeviitade tajumine sõltub otseselt inimese nägemissüsteemi omadustest, mistõttu mõjutavad silma füsioloogilised piirangud seda, kui hästi juht suudab visuaalset informatsiooni märgata ja tõlgendada.

### 1.1.2 Skotoopiline, mesoopiline ja fotoopiline nägemine

Inimese nägemissüsteemi toimimine sõltub otseselt keskkonna valgustasemest, kuna visuaalne taju on seotud võrkkestas paiknevate kepikeste ja kolvikeste aktiivsusega. Nende retseptorite panus muutub vastavalt heledustasemele ning eristatakse kolme peamist nägemisrežiimi: skotoopiline, mesoopiline ja fotoopiline nägemine. Fotoopilises nägemises domineerivad kolvikesed, skotoopilises nägemises kepikesed ning mesoopilistes tingimustes on aktiivsed mõlemad fotoretseptoritüübid.[4]

Fotoopiline nägemine esineb kõrge heledustasemega tingimustes, kus on peamiselt aktiivsed kolvikesed. Sellises režiimis on nägemisteravus kõrge ning inimese võime eristada detaile ja kontraste on kõige parem, mistõttu toimub visuaalse informatsiooni töötlemine efektiivselt. Fotoopiline nägemine on iseloomulik päevasele keskkonnale, kus objektide ja tekstide loetavus on hea.

Skotoopiline nägemine seevastu esineb väga madala heledustaseme korral ning põhineb peamiselt kepikeste aktiivsusel. Kepikesed on tundlikud vähese valguse suhtes, kuid nende ruumiline eraldusvõime on piiratud ja nad ei võimalda värvide eristamist. Seetõttu on skotoopilistes tingimustes visuaalne taju piiratud ja detailide eristamine raskendatud.

Mesoopiline nägemine paikneb nende kahe vahelises piirkonnas ning on iseloomulik olukordadele, kus valgustase ei ole piisav täielikult fotoopilise nägemise toimimiseks ega nii madal, et domineeriks üksnes skotoopiline nägemine. Selline nägemine esineb näiteks hämaruses ja öisel ajal kunstliku valgustuse korral. Nendes tingimustes on aktiivsed nii kepikesed kui kolvikesed ning visuaalne taju kujuneb nende ühisel koosmõjul. Nende panus nägemisse sõltub valgustasemest, mistõttu ei ole võimalik

kirjeldada visuaalset tundlikkust ühe kindla mudeli abil. Valgustaseme muutumisel ei muutu üksnes fotoretseptorite aktiivsus, vaid ka nägemissüsteemi tundlikkus erinevate lainepikkuste suhtes. See tähendab, et silma spektraalne tundlikkus sõltub valgustingimustest ning kepikeste ja kolvikeste omavahelisest panusest nägemisse, mis omakorda mõjutab visuaalse taju kujunemist mesoopilistes tingimustes. Mesoopiline nägemine esineb madalate ja keskmiste heledustasemete vahemikus, mille ülemine piir on ligikaudu 5-10 cd/m², kusjuures täpne piir sõltub mitmetest teguritest, nagu vaadeldava objekti suurus ja asukoht vaateväljas.[4]

Selles nägemisrežiimis sõltub visuaalne sooritus mitmest tegurist, sealhulgas taustheledusest, kontrastist, vaadeldava objekti suurusest ja asukohast vaateväljas. Kuna need tegurid võivad keskkonnas pidevalt muutuda, ei ole võimalik määrata üht kindlat valgustaseme väärtust, mis tagaks optimaalse nähtavuse kõikides olukordades.

Liikluskeskkonnas on mesoopiline nägemine eriti oluline, kuna suur osa sõidust toimub hämarates või ebapiisava valgustusega tingimustes just selles heledusvahemikus. Tee- ja tänavavalgustuse tingimustes jääb tüüpiline teepinna heledus vahemikku ligikaudu 0,3 kuni 2 cd/ $m^2$.[4]

Paljud juhile olulised visuaalsed ülesanded toimuvad tingimustes, kus nägemissüsteem ei ole optimeeritud maksimaalseks detailinägemiseks ega maksimaalseks valgustundlikkuseks. Sellistes olukordades võivad liiklusmärgid ja teeviidad olla küll piisavalt heledad, kuid nende loetavus võib olla vähenenud, kui kontrast ja detailide eristatavus ei ole piisav.

Öisel ajal liiklemisel peab juht suutma täita mitmeid olulisi visuaalseid ülesandeid, sealhulgas tuvastama teisi liiklejaid, märkama võimalikke takistusi teel, eristama sõiduraja piirdeid ning tee kulgu, samuti lugema liiklusmärke, viitasid ja hoiatusi, et teha õigeaegseid ja ohutuid otsuseid liikluses [4]. Seetõttu ei taga üksnes suur valgusintensiivsus head loetavust, vaid oluline on ka visuaalse informatsiooni esitamise viis ning kuidas see vastab inimese nägemissüsteemi omadustele mesoopilistes tingimustes.

Lisaks mõjutab nägemise kvaliteeti silma kohanemine erinevate heledustasemetega. Kohanemisprotsess ei ole hetkeline ning kiirete valgustingimuste muutuste korral, näiteks pimedasse keskkonda sisenemisel või vastutulevate sõidukite tulede pimestuse korral, võib nägemisteravus ajutiselt halveneda. See omakorda mõjutab juhi võimet visuaalset informatsiooni õigel ajal tajuda ja tõlgendada [4].

Seega on valgustingimustel otsene mõju nägemise kvaliteedile ning visuaalse informatsiooni töötlemisele. Liiklusmärgid ja teeviidad peavad toimima mesoopilistes

tingimustes ning olema kujundatud viisil, mis tagab nende hea nähtavuse ja loetavuse ka olukordades, kus nägemissüsteemi töö ei ole optimaalne.

Mesoopiline nägemine on liikluskeskkonna seisukohalt keskse tähtsusega, kuna suur osa sõidust pimedal ja hämaral ajal toimub heledusvahemikus, kus inimese nägemissüsteem ei ole täielikult optimeeritud ei detailide eristamiseks ega maksimaalseks valgustundlikkuseks. CIE (*Rahvusvaheline Valgustuskomisjon, pr Commission Internationale de l´Eclairage*) defineerib mesoopilise nägemise kui nägemisrežiimi, milles visuaalsetes ülesannetes osalevad samaaegselt nii kepikesed kui ka kolvikesed ning nende omavaheline panus sõltub valgustasemest, vaadeldava objekti suurusest ja asukohast nägemisväljas. Selline vahepealne seisund muudab visuaalse taju eriliselt tundlikuks nii valgustingimuste kui ka visuaalse info esitamise viisi suhtes.

Erinevalt fotoopilisest nägemisest, kus kolvikeste domineeriv roll tagab hea nägemisteravuse ja kontrastitundlikkuse, väheneb mesoopilistes tingimustes võime eristada peeneid detaile. Samas ei ole mesoopiline nägemine ka skotoopilise nägemisega võrreldav, kuna visuaalne taju ei piirdu üksnes suurte heleduse erinevuste ja kontuuride eristamisega. Selline vahepealne funktsionaalne seisund tähendab, et objektid ja märgid võivad olla juhile küll selgelt nähtavad, kuid nende detailne loetavus võib olla märkimisväärselt vähenenud. CIE toob selgelt esile, et mesoopilistes tingimustes ei kirjelda klassikaline fotoopiline heledus alati adekvaatselt visuaalset sooritust, eriti selliste ülesannete puhul nagu objekti äratundmine, kontrasti tajumine ja reageerimiskiirus.

Mesoopilise nägemise puhul muutub oluliseks ka nägemissüsteemi spektraalne tundlikkus. Kuna kepikeste ja kolvikeste spektraalsed tundlikkuskõverad erinevad, muutub tajutav heledus ja kontrast valgusallika spektraalse koostise muutumisel. CIE rõhutab, et just mesoopilistes tingimustes võib valgusallika spektraalne jaotus mõjutada visuaalset sooritust märgatavalt rohkem kui fotoopilistes tingimustes. See tähendab, et kaks füüsikaliselt sama fotoopilise heledusega olukorda ei pruugi anda juhile samaväärset visuaalset informatsiooni.

Liikluses lisandub mesoopilisele nägemisele ka dünaamiline komponent. Öisel sõidul muutuvad juhi vaateväljas pidevalt nii heledustasemed kui ka vaadeldavate objektide kaugus ja nurk. CIE käsitluses rõhutatakse, et öisel sõidul peab juht samaaegselt täitma mitmeid visuaalseid ülesandeid: tuvastama liikuvaid objekte, hindama tee geomeetriat ning lugema liiklusmärke ja teeviitu. Paljud neist ülesannetest toimuvad osaliselt perifeerses nägemisväljas, kus mesoopilise nägemise tingimustes on detailide eristusvõime oluliselt väiksem kui foveaalses nägemises. Seetõttu suureneb sõltuvus

kujunduslike tunnuste selgusest, nagu märkide kontrast, sümbolite kuju ja tekstiliste elementide eristatavus.

CIE raporti kohaselt ei ole mesoopilise nägemise puhul võimalik kirjeldada visuaalset sooritust ühe universaalse fotomeetrilise mudeliga, kuna visuaalne tulemus sõltub korraga mitmest tegurist: heledusest, kontrastist, sihtobjekti suurusest, asukohast vaateväljas ning spektraalsest koostisest. Just see mitmeteguriline sõltuvus põhjendab vajadust käsitleda liikluskeskkonda eraldi visuaalse ülesannete kogumina, mitte üksnes valgusnivoo või märgi olemasolu kaudu [4].

Seetõttu on mesoopiline nägemine liiklusmärkide ja teeviitade loetavuse hindamisel määrava tähtsusega. Kuna suur osa liiklusolukordadest langeb heleduse vahemikku, kus visuaalne süsteem ei toimi maksimaalse efektiivsusega, peavad nii märgipindade, materjalide kui ka visuaalse kujunduse lahendused olema kohandatud just mesoopiliste tingimuste jaoks [4]. See rõhutab vajadust siduda nägemisfüsioloogilised printsiibid otseselt liiklusmärkide kujunduspõhimõtetega ning loob aluse järgnevates peatükkides käsitletavatele valguse, retroreflektsiooni ja visuaalse disaini küsimustele.

Purkinje efekt aitab selgitada ka seda, miks kasutatakse liiklusviitadel sageli sinist taustavärvi. Stuart Anstis märgib oma uuringus, et pimedusega kohanemisel kandub silma maksimaalne tundlikkus üle kolvikestelt kepikestele ja selle tulemusena nihkub nägemissüsteemi spektraalne tundlikumaks lühemate lainepikkuste suunas, mis tähendab, et sinakad toonid tajutakse suhteliselt heledamatena võrreldes pikemate lainepikkustega. Eksperimentaalsed tulemused näitavad, et sinise valguse spektraalne efektiivsus võrreldes punasega suureneb vaatevälja perifeersuse kasvades ja see efekt võimendub pimedusega kohanemisel, kus kepikeste osakaal nägemises suureneb [5]. Sellest tulenevalt võivad sinised taustad olla hämarates ja öistes tingimustes paremini tajutavad.

### 1.1.3 Nägemise muutused vanuse ja valgustingimustega

Inimese nägemisvõime muutub nii vanuse kasvades kui ka keskkonna valgustingimuste mõjul. Eriti madala heledustaseme korral halvenevad mitmed visuaalsed funktsioonid, sealhulgas nägemisteravus ja kontrastitundlikkus, mille tulemusena väheneb detailide eristamise võime ning objektide tuvastamine muutub aeglasemaks [6]. See tähendab, et visuaalse informatsiooni töötlemine muutub vähem efektiivseks just olukordades, kus keskkonnast saadav info on juba piiratud.

Vananemisega kaasnevad muutused silma optilistes omadustes ning närvisüsteemi töötlusprotsessides, mille tulemusel võib visuaalse informatsiooni vastuvõtt ja tõlgendamine muutuda aeglasemaks ja ebatäpsemaks. On leitud, et vanematel

inimestel väheneb kontrastitundlikkus fotoopilistes tingimustes, eriti kõrgemate ruumiliste sageduste ehk peente detailide korral, mistõttu muutub väikeste objektide eristamine raskemaks [6]. See mõjutab otseselt teksti ja sümbolite loetavust, kuna just peened detailid on olulised tähtede ja märkide eristamisel. Kontrastitundlikkus on oluline mitte ainult detailide nägemiseks, vaid ka objektide tuvastamiseks ja eristamiseks taustast. Seetõttu võib kontrastitundlikkuse langus mõjutada lisaks ka liiklusmärkide märkamist ning teiste liiklejate tuvastamist keerukates visuaalsetes tingimustes.

Lisaks toimuvad vananemise käigus muutused ka silma optilistes omadustes. Läätse tihedus suureneb ning silmasisene valguse hajumine kasvab, mis vähendab võrkkestale jõudva kujutise kvaliteeti. Samuti väheneb pupilli läbimõõt, mille tulemusena jõuab võrkkestale vähem valgust [6]. Need muutused põhjustavad nägemise kvaliteedi langust ning võivad tekitada olukorra, kus objektid on küll nähtavad, kuid nende detailid ei ole piisavalt selgelt eristatavad.

Oluline roll nägemise kvaliteedis on ka visuaalse informatsiooni töötlemise kiirusel. Vananemisega kaasneb visuaalse töötluse aeglustumine, mistõttu kulub rohkem aega visuaalsete stiimulite tajumiseks ja nende tähenduse mõistmiseks [6]. See on eriti oluline liikluskeskkonnas, kus otsuste tegemine peab toimuma kiiresti ning viivitused suurendavad eksimisriski. Aeglasem visuaalne töötlus võib mõjutada liiklusmärkide lugemist, liiklussituatsioonide hindamist ja reageerimist ootamatutele sündmustele.

Valgustingimuste ja vanuse koosmõju avaldub eriti selgelt hämarates ja öistes tingimustes. Madala heleduse tingimustes halvenevad nägemisteravus, kontrastitundlikkus ja sügavustaju, mis muudab visuaalse keskkonna tajumise keerulisemaks [7]. See tähendab, et objektide ja tekstide eristamine muutub raskemaks ning visuaalse informatsiooni töötlemine nõuab rohkem aega ja pingutust.

Samuti vanusega aeglustub silma kohanemine erinevate valgustasemetega, eriti üleminekul heledast keskkonnast pimedasse [6]. See tähendab, et pärast ereda valguse all viibimist kulub rohkem aega, enne kui nägemine madala valgustaseme tingimustes taastub. See võib liikluses põhjustada ajutisi nägemisraskusi, näiteks tunnelisse sisenemisel või vastutulevate sõidukitulede pimestuse korral.

Seega on nii vanus kui ka valgustingimused olulised tegurid, mis mõjutavad nägemise kvaliteeti ja visuaalse informatsiooni tajumist. Nende tegurite koosmõju võib oluliselt vähendada visuaalse informatsiooni loetavust ja arusaadavust, eriti liikluskeskkonnas, kus informatsiooni tuleb kiiresti töödelda. Visuaalse info kiire ja täpne tajumine on otseselt seotud liiklusohutusega.

Seetõttu on liiklusmärkide ja teeviitade kujundamisel oluline arvestada nii valgustingimuste kui ka kasutajate erinevate nägemisvõimetega. Eriti tuleb tähelepanu pöörata olukordadele, kus visuaalne keskkond on ebasoodne, näiteks hämaruses või öisel ajal, ning kus kasutajate hulgas on ka vanemaealisi juhte. Sellistes tingimustes peab visuaalne info olema esitatud viisil, mis kompenseerib nägemissüsteemi piiranguid ja tagab piisava loetavuse.

Eelnevast tulenevalt muutub kriitiliseks ka see, kuidas visuaalne informatsioon on esitatud, sealhulgas kasutatav kirjatüüp, tähevahed ja kontrast. Ebasobiv kujundus, näiteks tihedalt paigutatud tähtedega fondide kasutamine, võib halvendada loetavust, eriti hämarates tingimustes, kus visuaalne tajumine on piiratud ning pimestus võib vähendada detailide eristatavust.

### 1.1.4 Kontrasti, pimestuse ja valguse hajumise mõju visuaalsele tajule

Visuaalse informatsiooni tajumine sõltub suurel määral kontrastist objekti ja selle tausta vahel. Kontrast kirjeldab objekti ja tausta heleduse erinevust ning määrab, kas objekt on üldse nähtav. Kontrastitundlikkus väljendab inimese võimet eristada väikeseid heleduse erinevusi ning seega määrab piiri nähtava ja nähtamatu vahel. Uuringud on näidanud, et objekti tajumine muutub usaldusväärselt nähtavaks alles siis, kui selle kontrast ületab teatud lävitaseme, mis on paljudel juhtudel ligikaudu 1% ning see ei sõltu paljudes tingimustes suurusest ja heledusest.[8]

Kontrastilävi määrab väikseima kontrastitaseme, mille juures objekt muutub nähtavaks. Selle pöördväärtus väljendab visuaalse süsteemi tundlikkust kontrasti suhtes ehk kontrastitundlikkust, mis määrab, kui väikeseid heleduse erinevusi inimene suudab tajuda. Madala kontrasti korral muutub objektide eristamine raskemaks ning visuaalse informatsiooni töötlemine aeglustub.[8]

Kontrastitundlikkus on oluline tegur detailide, teksti ja sümbolite tajumisel, kuna visuaalne süsteem peab suutma eristada heleduse erinevusi, et tuvastada objekti kuju ja struktuuri. Kui kontrast objekti ja tausta vahel väheneb, halveneb ka visuaalse informatsiooni tajumine ning objektide eristamine muutub aeglasemaks ja ebatäpsemaks. Seetõttu ei sõltu nähtavus üksnes objekti suurusest või valgustuse tugevusest, vaid eelkõige sellest, kas kontrast ületab inimese visuaalse süsteemi tajuläve.

Lisaks kontrastile mõjutab visuaalset taju oluliselt valguse hajumine silmas. Valguse hajumine tekib siis, kui silma sisenev valgus ei fokusseeri täielikult võrkkestale, vaid hajub silma optilistes struktuurides, nagu sarvkestas ja läätses. Selle tulemusena tekib

võrkkestale hajus valguskomponent, mis tekitab võrkkestal nn valgusloori ning vähendab kujutise kontrasti ja muudab detailide eristamise keerulisemaks. Valguse hajumine võib põhjustada nähtuse, kus eredate valgusallikate ümber tekib hajus valgus, mis vähendab nähtavust ja häirib visuaalset tajumist [9]. Seda nähtust seostatakse haloefektiga, mille korral valgus levib laiemale alale ning häirib läheduses olevate objektide tajumist. Uuringud on näidanud, et silmasisene valguse hajumine suurendab haloefekti ulatust ning on otseselt seotud pimestuse tekkega, kuna hajunud valgus tekitab võrkkestal valgusloori, mis halvendab visuaalset tajumist. Haloefekt avaldub eriti tugevalt olukordades, kus vaateväljas esineb ere valgusallikas, mistõttu suureneb hajunud valguse hulk ja väheneb kujutise kontrast [10]. Sellised nähtused raskendavad objektide ja detailide eristamist, eriti madala kontrastsusega piirkonnas.

Probleem süveneb veelgi, kui kasutatakse kitsaid kirjatüüpe. Kirjatüübi kujundus ja tähelaius mõjutavad otseselt teksti tajumise kiirust ja täpsust olukordades, kus seda tuleb lugeda lühikese aja jooksul. On leitud, et kitsama laiusega kirjatüübid võivad vähendada loetavust [11]. Eestis kasutatav kirjatüüp Arial Narrow Bold on kitsama laiusega, mille puhul tähekujud on horisontaalselt kokkusurutud. Sellised fondid on tundlikumad kontrasti vähenemise suhtes, mistõttu nende loetavus võib halveneda kiiremini võrreldes selgema ja suurema tähelaiusega kirjatüüpidega. Sellest võib järeldada, et olukorras, kus liiklusmärkide ja teeviitade pinnad tekitavad tugevat peegeldust ja pimestust suure peegeldusteguriga materjalide kasutamisel, võib haloefekt vähendada kujutise kontrasti ja esitatud teksti loetavust. Eesti liikluses kasutatavate teeviitade puhul võib see tähendada, et kirjatüübi ja kõrge peegeldusteguriga kile kombinatsioon ei pruugi tagada piisavat visuaalset eristatavust.

Liikluskeskkonnas on pimestus üks peamisi tegureid, mis mõjutab juhi nägemisvõimet, eriti öistes tingimustes. Uuringud on näidanud, et vastutulevate sõidukite esituled võivad põhjustada silmasisest valguse hajumist, mis omakorda vähendab kontrastitundlikkust ja nähtavuskaugust ning halvendab visuaalset sooritusvõimet. Selle tulemusena muutub objektide tuvastamine raskemaks ning väheneb võime eristada madala kontrastsusega objekte, mis on liikluskeskkonnas sageli kriitilise tähtsusega.[12]

Lisaks võib pimestust tekitada ka retroreflektiivsed liiklusmärgid sõiduki esitulede valgustuse mõjul. Retroreflektiivsed pinnad suurendavad liiklusmärgi nähtavust, kuna märgi heledus sõltub esitulede poolt tekitatud valgustusest. Kui märgi heledus ületab ümbritseva keskkonna keskmist heledust, paistab see vaatlejale pimestavalt ere ja võib juhile olla pimestusallikaks. Kaugemal asuvad või suurema pindalaga liiklusmärgid tekitavad seejuures tugevamat pimestust, kui sama eredusega väiksemad märgid, eriti vähese ümbritseva valgustuse tingimustes. [13]

Sellistes olukordades võib nähtavuskaugus väheneda märkimisväärselt, mis tähendab, et juhil on vähem aega reageerida teel olevatele objektidele või liiklusmärkidele. Pimestus võib vähendada ka objektide äratundmiskaugust, eriti kui tegemist on madala kontrastsusega objektidega.

Lisaks füsioloogilistele teguritele mõjutavad inimese nägemissüsteemi ka keskkondlikud tegurid, näiteks valguse hajumine erinevatel pindadel. Uuringud on näidanud, et näiteks sõiduki esiklaasi kulumine põhjustab valguse hajumist mikroskoopiliste pindmiste defektide tõttu, mille tulemusena väheneb läbi klaasi edastatava kujutise kontrast ning halveneb objektide nähtavus. On leitud, et mida suurem on pindade kulumine ja defektide hulk, seda suurem on valguse hajumine ning seda enam halveneb juhi vaate selgus.[14]

Seetõttu võib öelda, et informatsiooni kvaliteet sõltub lisaks silma füsioloogiale ka sellest, millises seisukorras on tuuleklaas. Tervikuna võib see veelgi halvendada objektide ja tekstide tajumist, eriti öistes tingimustes, kus visuaalne info on piiratud.

Kontrast, valguse hajumine ja pimestus on omavahel tihedalt seotud. Madala kontrasti, suurenenud hajumise ja tugeva pimestuse kombinatsioonis võib oluliselt väheneda objektide nähtavus ja loetavus. Liikluskeskkonnas on need tegurid eriti olulised, kuna visuaalne informatsioon tuleb omandada kiiresti ja sageli ebasoodsates valgustingimustes. Pimestus võib tekkida vastutulevate sõidukitulede või tugevate peegelduste tõttu, samas kui valguse hajumine võib vähendada liiklusmärkide ja teeviitade kontrasti. Sellistes tingimustes ei pruugi suurem valgusintensiivsus parandada loetavust, vaid võib hoopis vähendada visuaalse informatsiooni selgust.

Eelnevast tulenevalt ei sõltu visuaalse informatsiooni loetavus üksnes valguse hulgast, vaid ka kontrastist ning sellest, kuidas valgus hajub ja mõjutab kujutise kvaliteeti. Madala kontrasti, suurenenud hajumise ja tugeva pimestuse kombinatsioon võib oluliselt vähendada objektide nähtavust ja loetavust, eriti dünaamilises liikluskeskkonnas.

Seetõttu saab öelda, et liiklusmärkide ja teeviitade kujundamisel oluline arvestada kontrasti, pimestuse ja valguse hajumise mõjuga. Eriti oluline on see öisel ajal ja halbade ilmastikutingimuste korral. Ebasobiv kujundus, sealhulgas liiga väike kontrast või visuaalselt ebaselge kirjatüüp, võib halvendada loetavust hämarates tingimustes, kus visuaalne süsteem on piiratud ning pimestuse mõju on suurem.

Visuaalse soorituse seisukohalt ei määra informatsiooni tajutavust liikluskeskkonnas üksnes keskkonna absoluutne heledustase, vaid keskset rolli mängib vaadeldava objekti ja selle tausta vaheline kontrast. Kontrasti abil eristatakse objekti ümbritsevast

visuaalsest välja ning see on eelduseks nii visuaalse sihtmärgi tuvastamisele kui ka selle hilisemale äratundmisele. CIE käsitluses on kontrast üks peamisi parameetreid, mille kaudu hinnatakse visuaalset sooritust erinevates valgustingimustes.

Mesoopilistes nägemistingimustes ei kirjelda visuaalse taju toimimist enam üksnes fotoopiline heledus. CIE käsitluse kohaselt visuaalne sooritus sõltub kontrasti läveväärtustest, objekti suurusest, selle asukohast vaateväljas ning vaatlusega seotud ülesandest. See tähendab, et sama heledustaseme juures võib visuaalne tulemus erineda sõltuvalt sellest, kas ülesanne hõlmab lihtsalt objekti märkamist, selle äratundmist või kiiret reageerimist.

Raportis eristatakse mitut visuaalse sooritusse aspekti, sealhulgas märkamist, äratundmist ja reaktsiooniaega, mis ei allu ühtemoodi valguse ja kontrasti muutustele. Eriti mesoopilistes tingimustes võib objekt olla märgatav, kuid selle detailsem äratundmine nõuab suuremat kontrasti või pikemat vaatamisaega. Selline vahe märkamise ja äratundmise vahel on liikluskeskkonnas oluline, kuna juhil tuleb sageli teha otsuseid visuaalse informatsiooni põhjal piiratud ajavaruga.

Lisaks kontrastile mõjutab visuaalset sooritust keskkonnas esinev väga kõrge heledusega visuaalne informatsioon. CIE raportis käsitletakse olukordi, kus visuaalses välja esinevad väga heledad elemendid võivad mõjutada sooritust kontrasti vähenemise kaudu, eriti juhul, kui vaatamisülesanne toimub mesoopilistes tingimustes ja perifeerses nägemisväljas. Sellistes olukordades ei ole visuaalse sooritusse piirangud seotud üksnes valgusallika olemasoluga, vaid eelkõige sellega, kuidas see mõjutab kontrasti ja visuaalsete ülesannete lahendamist.

CIE rõhutab, et öine liiklemine kujutab endast mitme paralleelse visuaalse ülesande kombinatsiooni. Paljud neist ülesannetest toimuvad perifeerses nägemisväljas, kus visuaalne sooritus mesoopsetes tingimustes on piiratum kui tsentraalses vaates.[4]

Tulenevalt eeltoodust ei saa liikluskeskkonna visuaalset tajumist käsitleda üksnes valguse hulga kaudu. CIE lähenemine näitab, et visuaalse sooritusse hindamisel tuleb arvestada kontrasti, vaatamisülesande olemust ja vaadeldava objekti paiknemist nägemisväljas. Selline lähenemine on eriti oluline mesoopilistes tingimustes, kus nägemissüsteemi töö ei ole optimeeritud ei maksimaalse detailsuse ega maksimaalse tundlikkuse jaoks.

Seetõttu on kontrasti käsitlemine liiklusmärkide ja teeviitade nähtavuse ja loetavuse seisukohalt vältimatu osa visuaalse sooritusse mõistmisest. Liiklusmärgid ja visuaalne teave peavad toetama visuaalse ülesande edukat lahendamist olukordades, kus

kontrasti läved ja visuaalne tundlikkus määravad enam visuaalse tulemuse kui absoluutne heleduse tase.

### 1.1.5 Pilguliikumine ja vaateväli

Inimese nägemine on dünaamiline ning sõltub silmade liikumisest. Visuaalse informatsiooni tajumine sõltub suurel määral sellest, kuhu ja kui kiiresti pilk suunatakse. Silmaliigutused võimaldavad suunata foveaalset nägemist erinevatele objektidele ning koguda informatsiooni vaatevälja erinevatest piirkondadest. Nägemisprotsessis eristatakse kiireid silmaliikumisi ehk sakkaade ja nendevahelisi fikseerimisi. Sakkaadid on kiired silmaliigutused, mille abil pilk liigub ühelt punktilt teisele, fikseerimiste ajal toimub visuaalse informatsiooni vastuvõtt ja detailide töötlemine.[15]

Vaateväli hõlmab kogu ala, mida inimene suudab tajuda ilma silmi liigutamata. Nägemine ei ole ühtlane kogu vaatevälja ulatuses, vaid sõltub sellest, millisele võrkkesta osale kujutis langeb. Võrkkesta keskosas paikneb fovea, kus nägemisteravus on suurim. Fovea ümbruses asub parafoveaalne ala ning sellest väljaspool perifeerne nägemisala, kus nägemisteravus on oluliselt madalam. Perifeerne nägemine võimaldab haarata laiemat visuaalset keskkonda ning märgata liikumisi ja muutusi. Seetõttu ei ole kogu visuaalne informatsioon sama kvaliteediga. Detailne tajumine on võimalik vaid vaatevälja keskosas. Selline nägemissüsteemi ülesehitus tähendab, et objekti täpseks tajumiseks peab inimene suunama pilgu otse sellele, et kujutis langeks võrkkesta keskosale.[3]

Visuaalse informatsiooni kogumine toimub fikseerimiste ajal ning pilguliikumine on tihedalt seotud kognitiivsete protsessidega, nagu objekti tuvastamine ja tähenduse mõistmine [15]. See tähendab, et pilgu liikumine ei ole juhuslik, vaid sõltub sellest, millist informatsiooni on vaja keskkonnast omandada.

Seega, liikluskeskkonnas on vajalik nii kesk- kui ka perifeerse nägemise koostöö. Detailne informatsioon, nagu teeviitade tekst on tajutav üksnes foveaalses piirkonnas, samas kui perifeerne nägemine võimaldab jälgida ümbritsevat keskkonda. Perifeerne nägemine mängib olulist rolli näiteks jalakäijate või teiste sõidukite varajases tuvastamises.

Pilguliikumise ja vaatevälja piirangud mõjutavad otseselt visuaalse informatsiooni kättesaadavust. Kuna detailne nägemine on piiratud väikese piirkonnaga vaatevälja keskosas, peab juht suunama pilgu otse objektile, et seda täpselt tajuda. Sellest tulenevalt, peavad liiklusmärgid ja teeviidad peavad olema paigutatud ja kujundatud viisil, mis võimaldab neid kiiresti tuvastada. Kui objekt asub perifeerses vaateväljas, võib selle tuvastamine olla aeglasem ja vähem täpne.

Liikluskeskkonnas peab juht pidevalt jaotama oma tähelepanu erinevate visuaalsete ülesannete vahel. Näiteks tuleb samaaegselt jälgida teed, lugeda liiklusmärke ning hinnata teiste liiklejate käitumist. Selline visuaalne koormus eeldab efektiivset pilguliikumist ning piisavat vaatevälja ulatust. Ebapiisav pilguliikumine või tähelepanu ebaõige jaotamine võib olulise visuaalse informatsiooni märkamata jäämiseni viia.

Seetõttu on liiklusmärkide ja teeviitade kujundamisel oluline arvestada inimese nägemissüsteemi omadustega, sealhulgas pilguliikumise ja vaatevälja piirangutega. Märgid peavad olema piisavalt suured, kontrastsed ja optimaalselt paigutatud, et need oleksid perifeerses nägemisväljas kergesti märgatavad ning võimaldaksid pilgu suunamisel nendele kiiret ja täpset tuvastamist keskse nägemise abil.

### 1.1.6 Loetavuskaugus ja reaktsiooniaeg liikluses

Liikluskeskkonnas on visuaalse informatsiooni tajumine ajaliselt piiratud protsess, mille jooksul peab juht tuvastama objekti, lugema sellel oleva informatsiooni ning langetama otsuse edasiseks tegevuseks. Loetavuskaugus määrab, kui kaugelt on võimalik visuaalset informatsiooni, näiteks liiklusmärki või teeviita, tajuda, tuvastada ja mõista. See sõltub mitmetest teguritest, sealhulgas teksti suurusest, kontrastist, kirjatüübist ning valgustingimustest. Uuringud on näidanud, et suurem heledus ja parem kontrast parandavad visuaalse informatsiooni loetavust ning võimaldavad märki tuvastada suuremalt kauguselt.[16]

Loetavuskauguse tähtsus suureneb koos sõiduki liikumiskiirusega, kuna suurema kiiruse korral läbib sõiduk sama aja jooksul pikema vahemaa. Empiirilised uuringud on näidanud, et liiklusmärkide efektiivne loetavuskaugus väheneb märkimisväärselt suurematel sõidukiirustel. Näiteks vähenes loetavuskaugus ligikaudu 115 meetrilt aeglase liikumise korral umbes 81 meetrini maanteekiirusel (~60 mph), mis tähendab ligi 30% vähenemist.[17]

Lisaks on leitud, et juhil kulub ligikaudu 1,28 sekundit visuaalse informatsiooni töötlemiseks ja sellele reageerimiseks dünaamilistes sõidutingimustes [17]. Seetõttu peab liiklusmärkide informatsioon olema loetav piisavalt suurelt kauguselt, et juhil oleks võimalik see õigeaegselt omandada ja teha vajalikud otsused.

Reaktsiooniaeg liikluses kirjeldab ajavahemikku, mis kulub juhil ohu tajumisest kuni sellele reageerimiseni. Seda käsitletakse sageli tajumise ja reageerimisajana, mis hõlmab mitut järjestikust etappi: esmalt stiimuli tuvastamist, seejärel selle äratundmist ja tähenduse mõistmist, millele järgneb otsuse tegemine ning vastava tegevuse sooritamine. Praktikas jagatakse see sageli kaheks põhikomponendiks, tajumise ajaks ja liigutuse ajaks. Detailsemates käsitlustes eristatakse veelgi täpsemaid alaprotsesse,

nagu pilgu suunamine objektile, informatsiooni töötlemine ning füüsilise reaktsiooni käivitamine. Reaktsiooniaeg ei ole püsiv suurus, vaid varieerub sõltuvalt stiimuli iseloomust ja liiklussituatsioonist. Empiirilised uuringud näitavad, et erinevates olukordades võib reaktsiooniaeg olla ligikaudu ühe kuni kahe sekundi suurusjärgus, ulatudes lihtsamates olukordades umbes ühe sekundini ning keerukamates situatsioonides kuni kahe sekundini.[18]

Loetavuskauguse ja reaktsiooniaja vahel on otsene seos. Mida suurem on kaugus, millelt juht suudab informatsiooni tajuda ja mõista, seda rohkem aega jääb reaktsiooniajaga seotud protsessideks ning otsuse tegemiseks. Juhi võime liiklusmärki või teeviita õigeaegselt märgata ja mõista ei sõltu üksnes märgi olemasolust, vaid sellest, kas see on piisavalt varakult loetav, et võimaldada kogu tajumise ja reageerimise protsessi läbimist. Kui loetavuskaugus on ebapiisav, väheneb juhile jääv ajavaru ning suureneb tõenäosus, et informatsiooni ei jõua õigeaegselt töödelda ega sellele reageerida.

Seetõttu on liiklusmärkide ja teeviitade kujundamisel oluline arvestada nii visuaalse tajumise kui ka reaktsiooniaja piirangutega, et tagada informatsiooni õigeaegne kättesaadavus ja tagada ka liiklusohutus.

### 1.1.7 Teeviitade loetavuse mõju liiklusohutusele

Liiklusohutuse seisukohalt on teeviitade loetavus oluline, kuna loetamatud või halvasti nähtavad liiklusviidad võivad mõjutada juhi reageerimisaega ja otsustusprotsessi, suurendades liiklusõnnetuse riski.

Nägemine on sõiduki juhtimisel peamine informatsiooniallikas, kuni 90% vajalikust infost saadakse silmade kaudu. Objektide märkamist mõjutavad nende nähtavus ja kontrastsus tausta suhtes ning seejuures suurem heledus ja kontrast muudavad liiklusmärgid juhile paremini märgatavaks. Mida nähtavam on objekt või olukord teel, seda rohkem on juhil aega selle tajumiseks ja vastavalt reageerimiseks. Halb nähtavus seevastu vähendab juhi reageerimisaega ning suurendab liiklusõnnetuste tõenäosust. Erilist rolli mängib liiklusmärkide nähtavus öistes või halva nähtavusega tingimustes, kus hästi hooldatud retroreflektiivsed liiklusmärgid aitavad parandada loetavust [19].

Nullvisiooni põhimõtte kohaselt ei ole liikluses ükski surmaga või raske vigastusega lõppeb õnnetus aktsepteeritav. Liiklusohutusprogramm 2026-2035 lähtub ohutu liiklussüsteemi lähenemisest, mille keskne eeldus on, et inimesed teevad vältimatult vigu ning liiklussüsteem peab olema kujundatud selliselt, et need ei viiks traagiliste tagajärgedeni ja suunatud riskide ennetamisele ning ohtlike mõju leevendamisele enne, kui need viivad raskete õnnetusteni [20].

Lisaks liiklusõnnetuste vähendamine ei ole ainult inimelude kaitse küsimus, vaid omab ka olulist sotsiaalmajanduslikku mõju. Keskmine ühest liiklussurmast põhjustatud rahaline kahju inimkonnale moodustas 2024. aastal üle kolme miljoni euro ning vigastuste korral üle 40 000 euro [20]. Sellest tulenevalt on liiklusviitade loetavus oluline osa ohutu liiklussüsteemi toimimisest.

## 1.2 Valguse füüsika ja retroreflektsioon

### 1.2.1 Valguse omadused liikluskeskkonnas

Nägemine põhineb nähtaval valgusel, mis on osa elektromagnetilisest spektrist. Elektromagnetiline spekter kujutab endast pidevat elektromagnetilise kiirguse vahemikku, mis tekib elektrilaengute liikumisel ja levib lainetena ruumis. Inimese nägemissüsteem on tundlik vaid kitsale osale sellest spektrist, mida nimetatakse nähtavaks valguseks. Nägemine toimub siis, kui valgus peegeldub objektidelt ja jõuab silma, võimaldades tajuda ümbritsevat keskkonda. Valguse omadused, nagu lainepikkus ja intensiivsus, mõjutavad otseselt seda, kuidas objekte nähakse, sealhulgas nende värvust ja heledust [3]. Liikluskeskkonnas sõltub objektide nähtavus sellest, kuidas valgus objektidelt peegeldub ning kui suur osa peegeldunud valgusest jõuab vaatleja silma.

Päevasel ajal on peamiseks valgusallikaks päike, öisel ajal aga sõidukite esituled ja tänavavalgustus. Madalama valgustaseme korral halvenevad nägemisteravus ja kontrastitundlikkus, mistõttu muutub visuaalse informatsiooni tajumine keerulisemaks. Seejuures on leitud, et kuigi ruumiline orientatsioon võib jääda suhteliselt säilinuks, halveneb oluliselt objektide tuvastamine ja eristamine, mis suurendab riski, et olulised liiklusobjektid, nagu viidad või jalakäijad, jäävad õigeaegselt märkamata.[21]

Valguse jaotust ja levikut mõjutab peegeldumine, murdumine ja hajumine. Peegeldumine määrab, kui suur osa langevast valgusest objekti pinnalt tagasi suundub ning milline on selle suunajaotus, mõjutades seeläbi objekti heledust.[22]

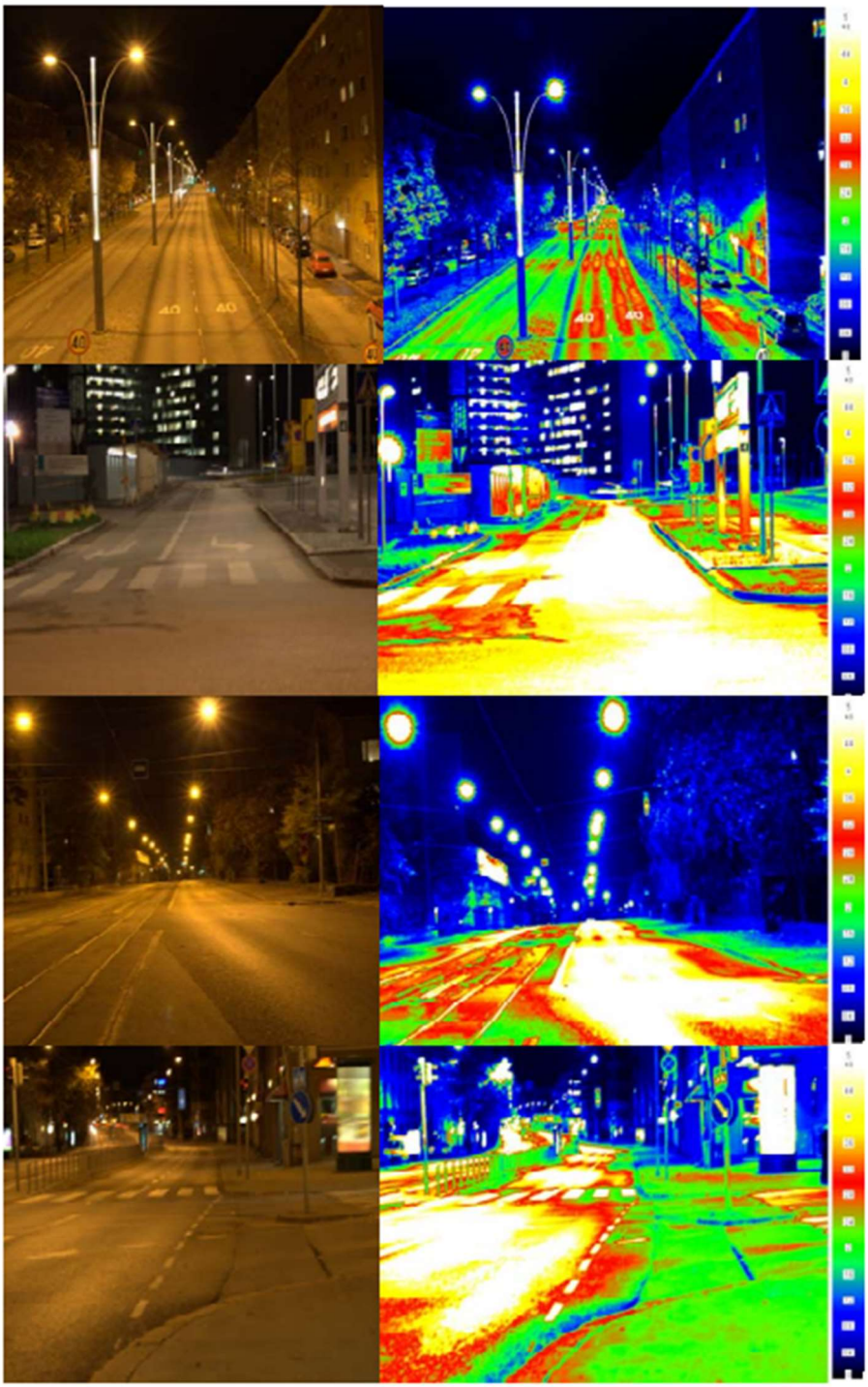
Objekti ja tausta vaheline kontrast on visuaalse tajumise seisukohalt määrava tähtsusega, kuna nägemissüsteem reageerib eelkõige visuaalsetele erinevustele, mille alusel eristatakse objekte ümbritsevast keskkonnast [4]. Kui objekt taustast ei eristu piisavalt siis võib selle tuvastamine olla raskendatud.

Valguse levimisel atmosfääris toimuvad hajumine ja neeldumine, mille tulemusena osa valgusest eemaldub levimissuunast ega jõua vaatlejani. Sellised protsessid vähendavad objektidelt pärineva valguse hulka ning mõjutavad seeläbi nende nähtavust. Kuna nähtavus sõltub otseselt atmosfääri optilistest omadustest, halveneb osakesterikka keskkonna, näiteks udu, vihma või lume korral objektide eristatavus ning visuaalne informatsioon muutub raskemini tajutavaks [23]. Sellised tingimused halvendavad nähtavust ning võivad oluliselt vähendada liiklusmärkide ja teeviitade loetavust, eriti olukordades, kus visuaalne informatsioon peab olema kiiresti ja täpselt tajutav.

Ilmastikutingimused mõjutavad otseselt liiklusviitade nähtavust ja loetavust. Udu peamised mõjud on kontrasti vähenemine ja värvide tuhmumine. Halb nähtavus on üks olulisemaid liiklusõnnetusi põhjustavaid tegureid. Ebasoodsates ilmastikutingimustes võivad liiklusmärgid muutuda raskesti nähtavaks või täielikult tajumatuks. Valguse hajumine atmosfääris on üks peamisi nähtavust mõjutavaid füüsikalisi protsesse, valguskiired hajuvad ning neelduvad uduosakeste ja molekulide toimel. Rayleigh hajumine kirjeldab olukorda, kus atmosfääris olevad osakesed on valguse lainepikkusest oluliselt väiksemad.

Oluline tegur liikluskeskkonnas on eredus, mis kirjeldab pinnalt vaatleja suunas peegelduva valguse hulka ning määrab, kui heledana objekt inimesele paistab. Heledus ei sõltu üksnes valgusallika tugevusest, vaid ka objekti peegeldusomadustest ning valgustuse geomeetriast, mis määravad, kui suur osa valgusest suunatakse vaatleja silma. Liikluskeskkonnas võivad heleduse tasemed oluliselt varieeruda sõltuvalt keskkonnatingimustest, näiteks märg, lumine või kuiv teekate muudab heledust ja selle jaotust visuaalses väljas. Objekti tajumine sõltub heleduse erinevusest objekti ja tausta vahel ehk kontrastist, mis on visuaalse eristamise aluseks. Uuringud näitavad, et sihtmärgi kontrast mõjutab otseselt visuaalset sooritust ning selle vähenemisel halveneb objektide tuvastamine ja eristamine. Liiklusoludes sõltub kontrast lisaks heledusele ka objektide peegeldusomadustest ning valgustuse paigutusest, mis määravad, kuidas valgus langeb objektile ja peegeldub vaatleja suunas [4]. Seetõttu on liiklusmärkide ja teeviitade puhul oluline tagada piisav heledus ja kontrast erinevates valgustingimustes.

Heleduse jaotuse varieeruvust liikluskeskkonnas illustreerib joonis 1, kus on näidatud, kuidas erinevad valgustingimused ja teepinna omadused mõjutavad visuaalset keskkonda.



Joonis 1. Linnatänava heledusjaotused heledusfotomeetriga mõõdetuna [4]

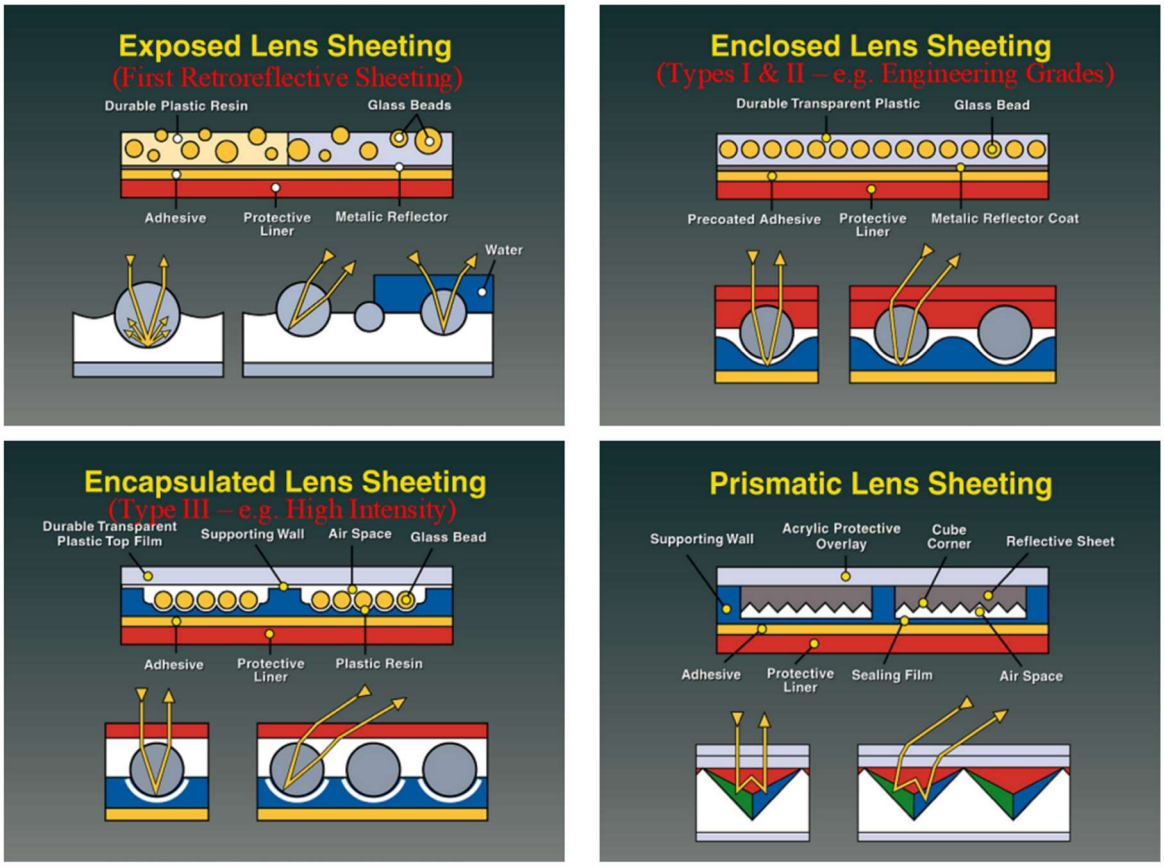
Seega sõltub visuaalse informatsiooni tajumine liikluskeskkonnas mitte ainult inimese nägemissüsteemist, vaid ka valguse füüsikalistest omadustest ja nende mõjust objektide nähtavusele. Valguse intensiivsus, suund, hajumine ning peegeldusomadused määravad, kui hästi on liiklusmärgid ja teeviidad erinevates tingimustes nähtavad ja loetavad.

### 1.2.2 Retrorefleksioon ja liiklusmärkide materjalid

Liiklusmärkide nähtavus, eriti öistes ja vähese nähtavusega tingimustes, põhineb suurel määral retrorefleksioonil. Retrorefleksioon on nähtus, mille korral objekt peegeldab langeva valguse tagasi selle lähteallika suunas, võimaldades juhil tajuda liiklusmärki sõiduki esitulede valguses. Selline omadus on eriti oluline öistes ja vähese nähtavusega tingimustes, kus liiklusmärkide nähtavus sõltub nende võimest peegeldada esitulede valgust tagasi vaatleja suunas [24]. Seega on retroreflektiivsete materjalide kasutamine liiklusmärkide ja viitade puhul hädavajalik, kuna ilma nendeta oleks märkide nähtavus pimedas oluliselt piiratud.

Retroreflektiivsete materjalide kasutamine suurendab liiklusmärkide heledust, kuna sõiduki esitulede valgus peegeldub tagasi juhi silma. Eredus määrab, kui heledana märk juhile paistab, sõltudes seejuures ka silma kohanemisest ümbritseva valgustasemega. Suurem heledus parandab liiklusmärkide nähtavust ja loetavust ning võimaldab juhil vajalikku informatsiooni kiiremini ja selgemini tajuda. Piisav heledus on eriti oluline öistes tingimustes, kus ümbritsev valgustase on madal ning visuaalse informatsiooni õigeaegne märkamine on liiklusohutuse seisukohalt kriitiline.[25]

Retroreflektiivsete materjalide toimimine põhineb peamiselt kahel tehnoloogial: klaaskuulidel ja mikroprismaatilistel struktuuridel. Klaaskuulide korral kasutatakse klaaskuule, mille abil suunatakse langev valgus läbi kuuli fookuspunkti ning seejärel peegeldub see tagasi valgusallika suunas [26]. Nende toimivus võib halveneda märgades tingimustes. Mikroprismaatilisi ehk kuupnurkset struktuuri korral peegeldub valgus mitmel prisma pinnal, mis võimaldavad valguse tagasisuunamist kolmemõõtmeliste prismade süsteemi abil.[27] [28]




Joonis 2. Retroreflektiivsete materjalide tüübid ja erinevus [29]

Joonisel 2 on kujutatud retroreflektiivsete materjalide peamised tüübid ja nende ehituspõhimõtted. Klaaskuulidel põhinevates materjalides suunatakse valgus tagasi valgusallika suunas sfääriliste osakeste abil, mikroprismaatilised materjalid kasutavad prismaatilisi elemente valguse tagasisuunamiseks. Lisaks selgub, et langemisnurk peegelduspinna suhtes mõjutab nii tagasipeegelduvuse intensiivsust kui ka selle hajuvust. Mida suurema nurga all valgus pinnale jõuab, seda madalam on tagasipeegelduva valguse intensiivsus. Tagasisuunatud valguskiired ka hargnevad, see hajuvus on vajalik, et tagasipeegelduv valgus jõuaks sõidukijuhi silma.

Liiklusmärkide nähtavust mõjutavad lisaks kasutatavale retroreflektiivsele materjalile ka mitmed välised tegurid, nagu märgi puhtus, paigalduskõrgus, keskkonnatingimused ning materjali vananemine. Uuringud näitavad, et mustus, tolm, lumi ja õhusaaste võivad märkimisväärselt vähendada retroreflektiivsust ning seeläbi halvendada märkide nähtavust. Samuti mõjutab retroreflektiivsust märgi paigutus - madalamale paigaldatud märgid määrduvad kergemini ning nende optiline toimivus võib olla halvem võrreldes kõrgemale paigutatud märkidega. Lisaks väheneb materjalide retroreflektiivsus aja jooksul ilmastiku, UV-kiirguse ja muude keskkonnamõjude tõttu. Retroreflektiivsete materjalide kasutusiga on samuti piiratud, olles ligikaudu 7 aastat RA1 klassi ning kuni

10 aastat RA2 ja RA3 klassi materjalide puhul [29]. Ka EVS 613:2023 Liiklusmärgid ja nende kasutamine ütleb, et RA1 klassi kile peab 7 aastat säilitama sellele kehtestatud nõuded 50% ulatuses ning RA2 klassi kile vähemalt 70% ulatuses 10 aasta vältel [30]. Seetõttu on oluline arvestada nii materjali tüübi, keskkonnamõjude kui ka selle optiliste näitajatega liiklusmärkide projekteerimisel ja hooldamisel, et tagada nende piisav nähtavus ja liiklusohutus.

Ameerika Ühendriikides reguleerib liiklusmärkide nähtavust ja retroreflektiivsust standard Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD), mis sätestab nõuded retroreflektiivsuse tagamiseks, et tagada märkide piisav nähtavus nii päevasel kui öisel ajal. MUTCD rõhutab, et liiklusmärkide loetavus peab olema tagatud kogu nende kasutusea vältel ning selleks tuleb märkide retroreflektiivsust regulaarselt hinnata ja vajadusel uuendada.[31]

Seega on liiklusmärkide projekteerimisel ja hooldamisel oluline tagada, et kasutatavad materjalid vastaksid kehtestatud retroreflektiivsuse klassidele ja standarditele. Piisav retrorefleksioon võimaldab saavutada vajaliku heleduse ja kontrasti erinevates valgustingimustes ning tagab, et liiklusmärgid on juhile õigeaegselt märgatavad ja loetavad, mis on liiklusohutuse seisukohalt kriitilise tähtsusega.

### 1.2.3 Retroreflektsiooni geomeetria

Retrorefleksiooni efektiivsus sõltub geomeetrilistest tingimustest, mille all valgus langeb pinnale ja peegeldub tagasi vaatleja suunas. Retroreflektiivsete materjalide toimivust määravad peamiselt valgusallika, liiklusmärgi ja vaatleja omavaheline asend, mida kirjeldatakse vaatlus- ja langemisnurkade abil. Need geomeetrilised parameetrid mõjutavad otseselt seda, kui suur osa langevast valgusest suunatakse tagasi juhi silma ning seeläbi määravad liiklusmärgi nähtavuse.[29]

Retrorefleksiooni kirjeldamisel on kaks peamist nurka: vaatlusnurk (α) ja langemisnurk (β). Vaatlusnurk on nurk, mis tekib sõiduki esitulede, liiklusmärgi ja juhi silmade vahel, kirjeldades vaatleja ja valgusallika suhtelist asendit. Väikese vaatlusnurga korral, kui juht ja valgusallikas paiknevad üksteisele lähedal, jõuab suurem osa peegeldunud valgusest tagasi juhi silma ning märk paistab heledam. Langemisnurk on nurk, mille all valgus langeb märgi pinnale ning mis sõltub sõiduki ja märgi omavahelisest asendist. Nende nurkade kombinatsioon määrab, kui efektiivselt suunatakse valgus tagasi vaatleja suunas.[29]

Retroreflektiivsete materjalide optiline toimivus sõltub oluliselt vaatlus- ja langemisnurkade väärtustest. Retroreflektiivsete materjalide optiline toimivus sõltub vaatlus- ja langemisnurkade väärtustest ning muutub nende nurkade muutumisel,

suurema nurga korral jõuab väiksem osa peegeldunud valgusest tagasi juhi silma. Samuti mõjutab langemisnurk retrorefleksiooni efektiivsust, ebasoodsate nurkade korral ei suunata valgus enam optimaalselt tagasi valgusallika suunas [29]. Seetõttu võib liiklusmärgi nähtavus oluliselt väheneda olukordades, kus sõiduk läheneb märgile suure nurga alt või kui märgi orientatsioon ei ole optimaalselt valitud.

Lisaks mõjutavad vaatlusnurka sõiduki esitulede kõrgus ja juhi silmade asend. Erinevate sõidukite puhul võivad vaatlusnurgad erineda, mis omakorda mõjutab liiklusmärkide nähtavust.[24]

Retrorefleksiooni geomeetria mängib olulist rolli liiklusmärkide projekteerimisel ja paigutamisel. Reaalses liikluses varieeruvad nii sõiduki asend kui ka valgustingimused. Vaatlus- ja langemisnurkade muutumine võib oluliselt mõjutada märgi heledust ja nähtavust Seetõttu tuleb liiklusmärkide paigutuse, kõrguse ja orientatsiooni valikul arvestada retrorefleksiooni geomeetriaga, et tagada valguse võimalikult efektiivne suunamine juhi silma. Valesti paigaldatud liiklusmärk või teeviit võib hämarates tingimustes olla halvemini nähtav, kuna suure langemisnurga korral väheneb tagasipeegelduva valguse hulk.

### 1.2.4 Retroreflektiivsed mõõdikud

Retroreflektiivsed materjalid jaotatakse vastavalt nende optilisele toimimisele klassidesse RA1, RA2 ja RA3, kusjuures kõrgem klass tähendab suuremat retroreflektiivsuse taset. Materjalid võivad olla kas klaaskuulidel põhinevad või mikroprismaatilised, millest viimased tagavad üldjuhul suurema valguse tagasisuunamise efektiivsuse. Retroreflektiivsust hinnatakse retroreflektsiooni väärtuse R alusel, mis väljendab pinnalt tagasipeegelduva valguse hulka suhtena pinnale langevasse valgustatusse ja selle põhjal saab määrata koefitsiendi (CR), mis võimaldab võrrelda erinevate materjalide optilist toimivust. CR kujutab endast konkreetse materjali retroreflektsiooniväärtuse suhet valitud referentsmaterjali väärtusesse, CR = R_materjal / R_referents. Uuringud näitavad, et sama klassi sees võivad materjalid siiski oluliselt erineda ning erineva retroreflektiivsusega materjalide kombineerimine ühel liiklusmärgil võib vähendada selle ühtlast nähtavust. Seetõttu on oluline arvestada nii materjali tüübi kui ka selle optiliste näitajatega, et tagada liiklusmärkide maksimaalne nähtavus ja liiklusohutus.[29]

| Sample | Class | Date | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 01.08.2017 | | 01.12.2018 | | 01.12.2019 | |
| | | R* | CR | R* | CR | R* | CR |
| 3M 3200 | $R_{A1}$ | 85.1 | 1 | 78.5 | 0.92 | 76.4 | 0.89 |
| AD 1500 | $R_{A1}$ | 79 | 0.93 | 74.1 | 0.87 | 69.8 | 0.82 |
| OR 5710 | $R_{A1}$ | 105.9 | 1.24 | 96.5 | 1.13 | 81.3 | 0.96 |
| 3M EGP | $R_{A1}$ | 127 | 1.49 | 118 | 1.38 | 104.9 | 1.23 |
| 3M 3930 | $R_{A2}$ | 665 | 7.81 | 649 | 7.62 | 618.7 | 7.27 |
| AD 6500 | $R_{A2}$ | 405 | 4.76 | 359 | 4.22 | 320.2 | 3.76 |
| OR 5910 | $R_{A2}$ | 591.5 | 6.95 | 550 | 6.46 | 484.5 | 5.69 |
| 3M 4090 | $R_{A3}$ | 768.1 | 9.03 | 763.1 | 8.97 | 688.7 | 8.09 |
| AD 7500 | $R_{A3}$ | 419.9 | 4.93 | 369 | 4.34 | 359.7 | 4.23 |
| OR 6910 | $R_{A3}$ | 431 | 5.06 | 425.5 | 5 | 374.2 | 4.40 |

*R – value of retroreflection ($cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$); CR – retroreflection coefficient

Joonis 3. Retroreflektiivsete materjalide optilised näitajad erinevatel ajahetkedel [29]

Joonisel 3 on esitatud erinevate retroreflektiivsete materjalide optilised näitajad, mis on mõõdetud kolmel järjestikusel aastal. Tulemused näitavad, et retroreflektiivsete materjalide toimivus erineb oluliselt nii erinevate klasside kui ka sama klassi sees. RA1 klassi materjalide retroreflektiivsuse koefitsiendi (CR) väärtused jäävad ligikaudu vahemikku 0,9-1,5, samas kui RA2 ja RA3 klasside materjalidel on need oluliselt kõrgemad, ulatudes vastavalt ligikaudu vahemikku 4-8 ja 5-9.[29]

Samuti ilmneb, et sama klassi materjalide vahel võivad esineda märkimisväärsed erinevused, mis kinnitab, et klassifikatsioon ei kirjelda täielikult materjalide tegelikku optilist toimivust. Lisaks näitavad tulemused, et retroreflektiivsus väheneb aja jooksul, mis viitab materjalide vananemisele ning keskkonnamõjudele. Seetõttu on oluline arvestada nii materjali klassi kui ka konkreetseid optilisi näitajaid liiklusmärkide projekteerimisel ja hooldamisel.

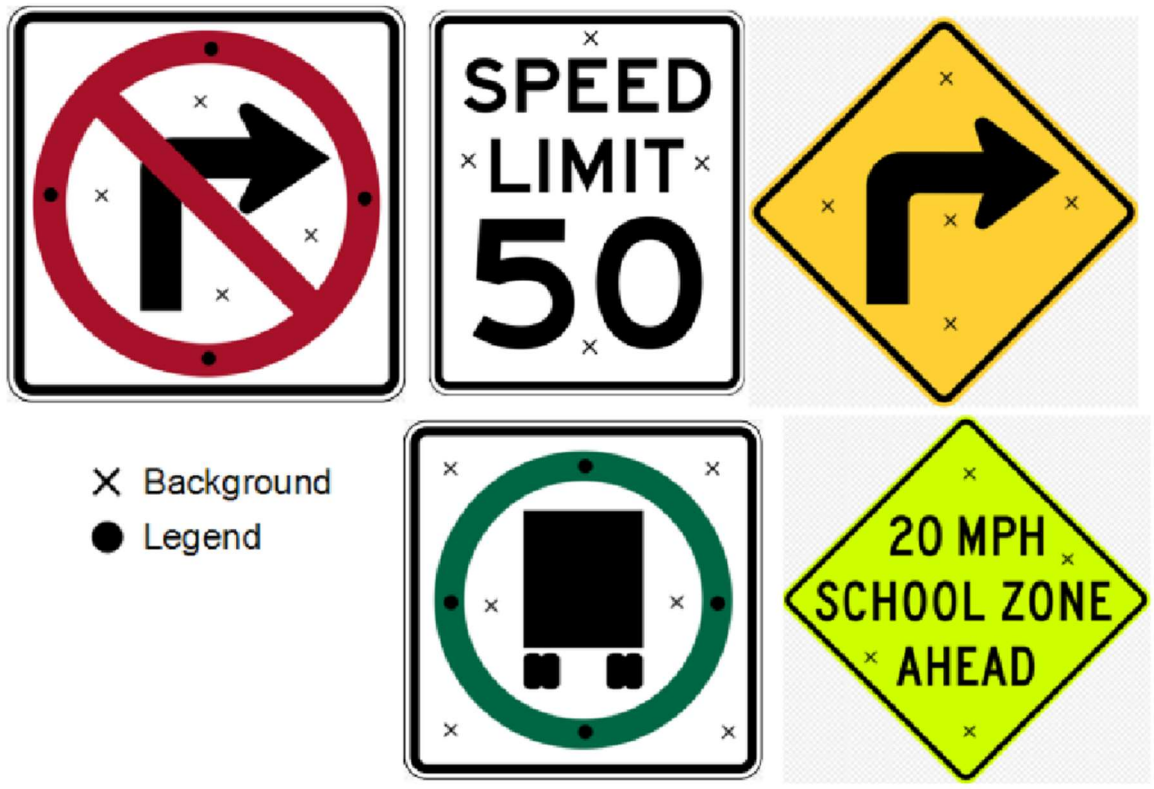
Retroreflektiivsete materjalide optilise toimivuse hindamiseks kasutatakse erinevaid mõõdikuid, mis võimaldavad kirjeldada materjali võimet peegeldada langev valgus tagasi valgusallika suunas. Nende mõõdikute abil on võimalik objektiivselt võrrelda erinevate materjalide omadusi ning hinnata nende sobivust liiklusmärkide valmistamiseks ja kasutamiseks.[29]

Üheks retroreflektiivsuse hindamise parameetriks on tagasipeegelduvuse koefitsient RA (kohati ka kirjeldatakse kui RL või R*), mille ühikuks on $cd \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$ ehk kandelat ruutmeetri ja luksi kohta. See näitaja väljendab tagasipeegeldunud valguse hulka pinnaühiku kohta kindlate valgustus- ja vaatlustingimuste korral ning võimaldab kvantitatiivselt hinnata materjali optilist toimivust [32]. Suurem väärtus viitab paremale

retroreflektiivsele omadusele ning seeläbi paremale nähtavusele, eriti öistes ja vähese nähtavusega tingimustes.

Lisaks absoluutsele retroreflektiivsusele kasutatakse ka suhtelist retroreflektiivsuse koefitsienti (CR), mis võimaldab võrrelda erinevaid materjale omavahel. CR väärtus lihtsustab erinevate materjalide optiliste omaduste võrdlemist ning annab ülevaate nende suhtelisest efektiivsusest.[29]

Retroreflektiivsust mõõdetakse spetsiaalsete seadmetega, mida nimetatakse retroreflektomeetriteks. Need seadmed mõõdavad pindade peegeldust kindlate nurkade juures, mis on esitatud standardites ja eeskirjades. Mõõtmisi saab teostada nii laboritingimustes kui ka välitingimustes, mis võimaldab hinnata materjalide toimivust nii kontrollitud kui ka reaalses keskkonnas. Mõõtmiste teostamiseks raskesti ligipääsetavates kohtades kasutatakse ka lisaseadmeid, näiteks pikendusvarsi koos kaugloetava ekraaniga [32]. Seega saab öelda, et välitingimustes tehtud mõõtmised annavad eriti olulist infot materjalide tegeliku toimivuse kohta liiklusolukorras.




Joonis 4. Näited mõõdetavatest punktidest liiklusmärkidel [32]



Joonis 5. Retroreflektomeeter Retrosign GRX [32]

Mõõtmistulemuste põhjal on võimalik hinnata retroreflektiivsete materjalide vastavust kehtestatud nõuetele ning võrrelda erinevate materjalide toimivust. Kuna on täheldatud, et retroreflektiivsuse väärtused vähenevad aja jooksul materjalide vananemise ja keskkonnamõjude tõttu, siis seetõttu on retroreflektiivsete mõõdikute kasutamine oluline nii materjalide valikul kui ka liiklusmärkide hoolduse ja asendamise planeerimisel, et tagada nende piisav nähtavus kogu kasutusea vältel.[29]

### 1.2.5 Kõrge intensiivsusega (HI) kile mõju visuaalsele tajule ja loetavusele

Kõrge intensiivsusega retroreflektiivsed kiled on laialdaselt kasutusel liiklusmärkidel ja viitadel, kuna need tagavad suure retroreflektiivsuse ning parema nähtavuse vähese valgustatuse tingimustes [26]. Samas kaasnevad nende materjalidega mitmed optilised piirangud ja nähtused, mis võivad mõjutada nii visuaalset tajumist kui ka liiklusohutust.

Kuigi üldiselt eeldatakse, et suurem retroreflektiivsus parandab liiklusmärkide nähtavust, siis teatud tingimustes võib see anda hoopis vastupidise efekti. Uuringud on näidanud, et näiteks pimedates ja eraldatud maapiirkondades, kus juhid kasutavad sageli kaugtulesid, peegeldavad kõrgeima intensiivsusega kiled valgust tagasi nii tugevalt, et märgi loetavuskaugus väheneb hoopis võrreldes madalama intensiivsusega materjalidega [33]. See kinnitab, et HI-kilede erakordselt suur optiline efektiivsus võib valedes keskkonnatingimustes muutuda probleemiks, mistõttu peab kile valik olema hoolikalt tasakaalustatud ümbritseva keskkonna valgustaseme ja oodatava valgusallika intensiivsusega, vältimaks liigsest heledusest tulenevat informatsiooni tajumise halvenemist.

Kuigi HI-kiled tagavad liiklusmärkide hea märgatavuse suurelt kauguselt, kaasneb nendega ka spetsiifiline optiline probleem. Kuna retroreflektiivsuse tase on neil kõrge, peegeldavad need sõidukite esitulede valguse juhile tagasi suure intensiivsusega, mille tulemusena võib märgi heledus muutuda väga suureks. Eriti öistes tingimustes ja lähivaatlusel võib see põhjustada olukorra, kus märgi kõige eredamad piirkonnad tekitavad visuaalset ebamugavust. On leitud, et ebamugavuspimestuse tajumine sõltub mitte ainult valguse üldisest tasemest, vaid ka valgusallika maksimaalsest heledusest, mistõttu võivad väga heledad pinnad osutuda juhile häirivaks. Lisaks võib märkide liigne heledus põhjustada tähtede ja sümbolite ülekiirgamise efekti, mille korral heledad alad näivad visuaalselt laienevat ning muudavad nende piirjooned hägusaks, vähendades otseselt märgi loetavust.[34]

Üheks peamiseks probleemiks kõrge intensiivsusega ja mikroprismaatiliste kilede puhul on optiline ülekiirgamine ehk haloefekt. Uuringud on näidanud, et kuna uued mikroprismaatilised materjalid toodavad varasemate klaashelmestel põhinevate kiledega võrreldes tunduvalt kõrgemaid heledustasemeid (valgustugevust), on suurenenud ka ülekiirgamise oht [35]. Praktikas tähendab see, et intensiivse tagasipeegelduse tõttu valgub valgus heledalt tekstilt tumedamale taustale, muutes teksti hägusemaks.

See optiline nähtus mõjutab otseselt tähtede anatoomiat. Ülekiirgamine, mida käsitletakse sageli koos optilise nähtusega halo-efekt, muudab heledad tähejooned visuaalselt paksemaks, mille tagajärjel võivad suletud siseosadega tähtede (nagu "a", "e" ja "o") avatud ruumid valgusega täituda. See laialivalguv efekt vähendab märkide kontrastsust ja detailide teravust, mis omakorda lühendab potentsiaalselt märkide loetavuskaugust ning jätab juhile reageerimiseks vähem aega.[36]

Optiline ülekiirgamine ehk halo-efekt on nähtus, mis tekib olukorras, kus vaateväljas esineva tugeva valgusallika intensiivsus ületab silma kohanemistaseme, põhjustades nähtavuse vähenemist ehk pimestumist. Sellisel juhul hajub osa silma sisenevast valgusest sarvkestas ja läätses, mille tulemusel tekib võrkkestal ühtlane kujutist vähendav looriv heledus. See hajunud valgus vähendab vaadeldava objekti kontrasti ning detailid muutuvad raskesti eristatavaks.

Eelnevalt saab öelda, et kirjeldatud ülekiirgamise kontekstis muutub kriitiliseks teeviitadel kasutatava kirjatüübi geomeetria. Paksud ja kitsad kirjatüübid, nagu näiteks Eestis laialdaselt kasutatav Arial Narrow Bold, on halo-efekti suhtes eriti tundlikud. Kuna antud kirjatüübi tähejooned on juba algselt laiad ning kitsa proportsiooni tõttu on tähtede siseosad ja tähevahed anatoomiliselt väikesed, toob HI-kile tekitatud valguse valgumine kaasa nende tühimike kiire täitumise. See tähendab, et antud fondi ja kile

kombinatsioonis kaob märgi loetavus märkimisväärselt kiiremini ja väiksema heleduse juures. Oluline on arvestada, et optilise kudedes toimuva valguse hajumise ulatus on tugevas seoses liikleja vanusega. Vananedes silma läätse tihedus suureneb ja valguse hajumine silma sisemuses suureneb, mistõttu kogevad vanemad juhid loorivat heledust ja halo-efekti kordades tugevamalt kui nooremad juhid.

Liiklusmärkide loetavuse ja nähtavuse hindamisel kasutatakse lisaks objektiivsetele fotomeetrilistele suurustele ka mudeleid, mis seovad valgusfüüsika otseselt inimese visuaalse sooritusega. Üheks selliseks mudeliks on suhtelise visuaalse sooritusе (Relative Visual Performance, RVP) mudel, mille töötasid välja Rea ja Ouellette ning mida on hiljem rakendatud ka liiklusmärkide loetavuse hindamisel reaalses liikluskeskkonnas [37].

RVP kirjeldab, kui kiiresti ja täpselt on vaatleja võimeline visuaalset informatsiooni töötlema antud valgustingimustes, võrreldes referentsolukorraga. Referentsiks loetakse väga häid nägemistingimusi, näiteks suure kontrastiga ja piisava heledusega tekst ruumivalgustuse all, mille RVP väärtus on määratud 1,0. Madalamad RVP väärtused viitavad aeglasemale ja vähem täpsele visuaalsele sooritusele.

RVP väärtus sõltub mitmest visuaalsest parameetrist, sealhulgas vaadeldava objekti nurklisest suurusest, tausta heledusest, objekti ja tausta heleduskontrastist ning vaatleja vanusest [37]. Mudel kirjeldab mitte ainult nähtavuse olemasolu, vaid ka visuaalse ülesande täitmise efektiivsust, võimaldades eristada olukordi, kus objekt on küll tajutav, kuid selle äratundmine ja töötlemine on aeglane või ebatäpne.

RVP väärtus 0 tähistab ligikaudset äratundmispiiri, millest allpool objekt võib olla küll detekteeritav, kuid mitte usaldusväärselt äratuntav. Negatiivsed RVP väärtused iseloomustavad olukordi, kus visuaalne objekt ei ole praktiliselt äratuntav. Uuringutes on leitud, et linnalistes liikluskeskkondades võib RVP väärtust 0,8 pidada piisava visuaalse sooritusе kriteeriumiks, mille puhul juht suudab liiklusmärgil oleva informatsiooni lugeda ja töödelda ilma märkimisväärse viivituseta.[37]

Oluline on, et RVP mudel ei ole lineaarne valguse suurenemise suhtes. Kui heledus ja kontrast on juba mõõdukalt kõrged, ei pruugi nende edasine suurendamine visuaalset sooritust enam oluliselt parandada [37]. See seletab, miks väga kõrge heleduse ja peegeldavusega liiklusmärgid võivad küll paista eredamad, kuid ei pruugi anda juhile praktilises mõttes paremat loetavust ega lühemat reaktsiooniaega.

Kõrge intensiivsusega retroreflektiivsete materjalide mõju liiklusmärkide loetavusele on uuritud ka reaalses liikluskeskkonnas tehtud välitööde põhjal. New Yorgi linnakeskkonnas analüüsiti paigaldatud valgustamata kiirteeviitasid, mis olid

valmistatud erinevat tüüpi kõrge retroreflektiivsusega materjalidest, ning võrdlesid nende visuaalset sooritust AASHTO soovituste kohaselt valgustatud viitadega. Märkide heleduse ja kontrasti mõõtmiste põhjal hinnati nende loetavust suhtelise visuaalse sooritusе mudeli abil.

Tulemused näitasid, et uute kõrge jõudlusega retroreflektiivsete materjalidega valmistatud valgustamata märgid saavutasid vaatamiskaugusel 100 m RVP ehk suhtelise visuaalse sooritusvõime (Relative Visual Performance) väärtused, mis olid võrreldavad ning mõnel juhul ka samaväärsed normidele vastavalt valgustatud märkidega. Kõik uuritud märgid ületasid RVP väärtuse 0.8, mida on peetud piisavaks visuaalse sooritusе kriteeriumiks linnalistes tingimustes. Arvutatud visuaalsete reaktsiooniaegade erinevused valgustatud ja valgustamata märkide vahel jäid vahemikku kümneid millisekundeid, mis vastab ligikaudu 1-2 meetrile läbisõidule kiirusel 80 km/h ning mille praktiline mõju sõiduki juhtimisele on väike.[37]

Uuring rõhutab, et liiklusmärkide loetavus ei sõltu ainuüksi nende absoluutsetest heleduse tasemetest, vaid eeskätt kontrasti, vaategeomeetria, vaatamiskauguse ja visuaalse ülesande koosmõjust [37]. Seega võivad sobivalt valitud ja projekteeritud retroreflektiivsed materjalid tagada piisava loetavuse ka ilma täiendava välisvalgustuseta, tingimusel et märgi kujundus toetab detailide eristatavust ja visuaalse informatsiooni kiiret töötlemist.

## 1.3 Liiklusviitade visuaalne disain

### 1.3.1 Tüpograafia alused

Tüpograafia mängib keskset rolli visuaalse informatsiooni edastamisel, eriti liikluskeskkonnas, kus teabe tajumine peab toimuma kiiresti ja piiratud ajavahemikus. Kirjatüübi loetavus ja loetavuskogemus sõltuvad mitmest omavahel seotud tegurist, sealhulgas tähe kujust, proportsioonidest, vahedest ning kontrastist [38]. Teaduskirjanduses eristatakse kahte fundamentaalset mõistet: loetavuskogemus ja loetavus. Loetavuskogemus viitab kergusele, millega lugeja suudab töödelda ja mõista pikemat, jätkuvat teksti [39]. Seevastu loetavus defineerib võimet kiiresti ja täpselt tuvastada ning eristada üksikuid märke või lühikesi sõnu [38]. Liiklusmärkide ja teeviitade kontekstis on esmatähtis just loetavus ehk võime sümboleid ja sõnu kiiresti dešifreerida juba kaugelt, sageli piiratud aja ja ka ebapiisavates valgustingimuste korral.[40]

Kirjatüüpide loetavust mõjutavad otseselt tähe anatoomilised omadused: tähejooned, siseosad, üla- ja alapikendused ning tähe üldine kuju. Oluline on mitte ainult üksikute vormide selgus, vaid ka tähtede omavaheline eristatavus. Selgelt eristatavad ja lihtsad tähevormid parandavad märgatavalt sümbolite äratundmist, eriti väikese vaatenurga või halva nähtavuse korral.[38]

Eriti oluline on tähe siseosade suurus ja avatus. Avatumad siseosad võimaldavad paremat kuju eristamist, samas kui väikesed või suletud siseosad võivad visuaalselt täituda, eriti madala kontrasti või valguse hajumise tingimustes. Tähejoonte paksenemine vähendab tähe siseosade pindala, väikeste visuaalsete nurkade korral kaovad peenemad detailid. Nende tegurite koosmõju halvendab tähtede eristatavust ja detailide tajumist [41]. See aspekt on kriitiline liiklusmärkide puhul, kus detailide kadumine võib otseselt mõjutada informatsiooni tajumist.

Seda illustreerib joonis 6, kus on näha, et suurema joonepaksuse korral muutuvad tähe siseosad oluliselt väiksemaks.



Joonis 6. Tähejoonte paksuse mõju siseosade suurusele ja kujule [41]




Joonis 7. Tähtede kujutamine erineva joonepaksuse korral Ovink kirjatüübis [41]

Joonis 7 illustreerib tähejoonte paksuse süsteemset muutumist ning selle mõju tähe kujule. Näidatud on sama kirjatüübi tähed viies erinevas joonepaksuse astmes, alates väga õhukesest (Light) kuni tugevalt paksendatud (Bold) variandini. On näha, et joonepaksuse suurenedes väheneb järk-järgult tähtede siseosade pindala ning tähevormid muutuvad visuaalselt kompaktsemaks. Numbrid paremal tähistavad tähejoone paksuse ja tähe kõrguse vahelist suhet.

Selline muutus mõjutab otseselt tähtede eristatavust, kuna väiksemad siseosad ja tihedamad vormid vähendavad detailide nähtavust. Eriti väikeste visuaalsete nurkade korral, kus tähti vaadeldakse suurelt kauguselt, võivad need detailid osaliselt kaduda, muutes tähekujud üksteisega sarnasemaks ning raskendades nende kiiret tuvastamist.[41]



Joonis 8. Tähe detailide mõju äratundmisele ja loetavusele [39]

Ülaloleval joonisel on visuaalselt esitatud, kuidas tähe konstruktsioonielemendid mõjutavad tähe kuju tajuvust ning loovad aluse ka tähe äratundmisele ka ebasoodsates vaatamistingimustes. Avatumad tähekujud ja selgemad sisevormid parandavad tähe äratundmist.

Kirjatüüpide laius ja proportsioonid on seotud tajumise kiirusega. Kitsad kirjatüübid (nagu Condensed või Narrow) võimaldavad küll mahutada piiratud pinnale rohkem teksti, kuid nende kasutamine vähendab oluliselt tähtedevahelist eristatavust [38]. Uuringud on näidanud, et tähtedevaheline kaugus ja tähtede laius mõjutavad otseselt lugemisteravust, kusjuures suurem tähevahe ja avaramad proportsioonid parandavad lugemistulemusi [42]. See nähtus on seotud nii-öelda crowding-efektiga (visuaalse tunglemisega), mille puhul lähedal asuvad sümbolid häirivad üksteise tajumist ning vähendavad üksikute tähtede äratundmist, eriti perifeerses nägemisväljas. Kui tähed paiknevad liiga lähestikku, ei suuda inimsilm neid eraldi töödelda, vaid tajub neid ühtse visuaalse mustrina ehk loetamatu "tekstiklombina".[39]

Liikluskeskkonnas muutub visuaalne tunglemine eriti kriitiliseks koosmõjus moodsate materjalidega. Nagu ka varasemalt käsitletud, põhjustavad kõrge intensiivsusega retroreflektiivsed materjalid (HI-kile) sõiduki esitulede valgusvihus valguse hajumist ja ülekiirgamist ehk haloefekti. Selle optilise nähtuse tulemusena suureneb tajutav tähejoone paksus, kuna halo-efekt paisutab valguskontrasti piire. Selline visuaalne paisumine mõjutab otseselt kirjatüübi loetavust: kitsaste proportsioonide ja väikeste

siseavadega fontide puhul täidab hajunud valgus kiiresti tähtedevahelise ruumi, suurendades visuaalset tunglemist ning raskendades üksikute tähtede eristamist. Uuringud näitavad, et piiratud tähtedevaheline kaugus soodustab crowding-efekti, kus naabersümbolid hakkavad üksteist visuaalselt segama. Lisaks võib halo-efekt põhjustada olukorra, kus tähtede detailid sulanduvad omavahel, eriti kui tähejooned on juba algselt paksud või vahed kitsad. Sellisel juhul kaob tähe anatoomiline eristatavus ning märgi loetavuskaugus väheneb. Vastupidiselt sellele on leitud, et avaram tähevahe ja suuremad siseosad aitavad vähendada halo negatiivset mõju, takistades täheosade kokkusulamist.[40]

Tüpograafia aluste käsitlemisel on oluline arvestada, et liikluskeskkonnas ei paikne visuaalne informatsioon isoleeritult, vaid on osa keerukast ja mitmekihilisest visuaalsest väljast. Juhi tähelepanu on liiklemisel jaotatud mitme samaaegse tegevuse vahel ning tekstiline informatsioon peab olema tajutav olukordades, kus selle vaatamine toimub sageli lühiajaliste ja katkendlike pilgufikseerimiste kaudu. Sellistes tingimustes suureneb tüpograafiliste lahenduste roll, kuna visuaalne informatsioon peab olema mõistetav kiiresti ja minimaalse pingutusega.

Tekstiliste elementide tajumine ei toimu üksikute tähtede eraldi vaatlemise kaudu, vaid kujuneb sõnade ja tekstiplokkide kui visuaalsete tervikute alusel. Tähtede kujud, nende omavaheline paigutus ning tekstiploki sisemine struktuur moodustavad visuaalse rütmi, mis mõjutab oluliselt loetavuskogemust. Kui tekstiline ülesehitus on ebaühtlane või visuaalselt liiga tihe, võib see suurendada tajukoormust ning aeglustada informatsiooni töötlemist, eriti olukordades, kus vaatamisaeg on piiratud.

Liikluskeskkonnas on tüpograafilised valikud tihedalt seotud inimese nägemisvõime füsioloogiliste piirangutega. Teksti tajumine toimub sageli hämarates valgustingimustes ning osaliselt perifeerses nägemisväljas, kus detailide eristamisvõime ja kontrastitundlikkus on võrreldes tsentraalse vaatamisega piiratumad. Sellistes tingimustes omandavad suurema tähenduse kirjatüübi üldised vormilised omadused, mis toetavad teksti äratundmist ka siis, kui kogu kujutis ei ole vaadeldav optimaalsel kaugusel või täpselt vaatevälja keskmes.

Seega ei saa tüpograafia rolli liikluskeskkonnas käsitleda üksnes visuaalse kujunduse aspektist, vaid see on tihedalt seotud sellega, kuidas visuaalne informatsioon erinevates vaatamis- ja valgustingimustes tajutavaks muutub. Kirjatüübi vormilised omadused, nagu siseosade avatus ja elementide omavaheline eraldatus, mõjutavad otseselt teksti äratundmist olukordades, kus visuaalne pilt on moonutatud või vaatlusaeg piiratud. Tüpograafia aluste mõistmine võimaldab hilisemates peatükkides analüüsida, kuidas

konkreetsed kirjatüübi- ja materjalivalikud suhestuvad inimese tajuvõime ning liikluskeskkonna tegelike kasutustingimustega.

### 1.3.2 Kirjatüübid liikluskeskkonnas

Eestis reguleerib liiklusmärkide ja suunaviitade kujundust, paigaldust, sealhulgas teksti esitust, standard EVS 613 "Liiklusmärgid ja nende kasutamine", mille uusim hetkel kehtiv versioon on 2023 mis näeb ette kirjatüübi Arial Narrow Bold [30]. Kuigi kitsa ja paksu kirjatüübi valik võis standardi loomise ajal tunduda praktiline ja majanduslikult põhjendatud - võimaldades mahutada pikki eestikeelseid kohanimesid väiksematele märgipindadele, on kaasaegsete liikluskeskkonna tingimuste ja uute retroreflektiivsete materjalide (HI-kile) valguses ilmnenud selle kirjatüübiga ka puudused.

Arial Narrow Bold on oma olemuselt võrreldes standardsega kokku surutud proportsioonidega (narrow) ja tugevdatud tähejoontega (bold) kirjatüüp. Eelnevalt käsitletud loetavusteooriate põhjal on teada, et paksud tähejooned koos kitsendatud proportsioonidega vähendavad drastiliselt tähe siseosade suurust ja muudavad tähtedevahelise vaba ruumi minimaalseks [38]. See viib olukorrani, kus kõrgpeegelduvusega helkurkilel tekkiv halo-efekti tõttu tähejooned visuaalselt laienevad ja detailid sulanduvad kokku, eelkõige ongi just seetõttu tarvis loetavust parandada.[40]

Seega võib eelnevalt kokkuvõttes öelda, et liikluskeskkond nõuab spetsiaalselt selleks otstarbeks kindlat kirjatüüpi, mis on optimaalselt loetav ka suurtel kiirustel ja ebasoodsates valgustingimustes.

Suurbritannia liiklusmärkidel kasutatakse spetsiaalselt välja töötatud kirjatüüpi Transport, mis on kujunenud üheks oluliseks aluseks kaasaegses liiklustüpograafias. Vastavalt Traffic Signs Manual juhistele põhineb kogu liiklusmärkide tekst spetsiaalselt disainitud tähestikul, mille eesmärk on tagada maksimaalne loetavus erinevates keskkonnatingimustes.

Transport-kirjatüübil on kaks varianti: Transport Medium ja Transport Heavy, mida kasutatakse sõltuvalt tausta ja teksti kontrastsusest. See lahendus arvestab optilise nähtusega, mille puhul heledad tähed tumedal taustal näivad visuaalselt paksemad ning tumedad tähed heledal taustal õhemad. Medium on kasutusel valgete tähtedena rohelisel, sinisel, pruunil, punasel või mustal taustal haloefekti kompenseerimiseks. Heavy on paksem ja seda kasutatakse valgel, kollasel või oranžil taustal mustade tähtedena. [43]

Standard rõhutab, et liiklusmärkide sõnum peab olema juhile kiiresti ja üheselt mõistetav [43]. Selline nõue seab kõrged nõuded liiklusmärkide kujundusele, sealhulgas kirjatüübi loetavusele, tähtede eristatavusele ja visuaalsele selgusele.

Lisaks kasutatakse kiirteedel spetsiaalset suurendatud Motorway kirjatüüpi, mis on mõeldud peamiselt teekonnanumbrite kuvamiseks. Ka siin on kaks varianti - Motorway ja Motorway Black, esimest kirjatüüpi kasutatakse valgete tähtedega sinisel taustal püsivatel märkidel ning teist kirjatüüpi mustade tähtedega kollasel taustal ajutistel märkidel.[43]

Lisaks on Suurbritannia liiklusmärkide süsteemis kasutusel väike- ja suurtähtede kombinatsioon. See parandab sõnade äratundmist võrreldes läbiva suurtähtkirjaga, kuna sõnade kuju muutub visuaalselt eristatavamaks.[36]

Saksamaal on kasutusel kirjatüüp DIN 1451, mis on välja töötatud standardiseeritud kirjatüübina, eesmärgiga pakkuda ühtset ja laialdaselt rakendatavat tähestikku erinevates valdkondades, sealhulgas tööstuses, avalikus ruumis ja liiklusmärkidel. See kinnitati standardina 1936. aastal ning kujundati võimalikult lihtsaks ja funktsionaalseks. 1995. aastal loodud digitaalne versioon aitas kaasa kirjatüübi rahvusvahelisele levikule ja laiemale kasutuselevõtule. Kirjatüübi disaini iseloomustab geomeetriline lihtsus ja ühtlane vormikeel, mille eesmärk oli saavutada kõige lihtsam ja rangelt funktsionaalne tähekuju, nagu seda kirjeldati standardi väljatöötamisel.[44]

DIN 1451 kirjatüübi puhul on kasutusel kaks varianti Engschrift ja Mittelchrift. Esimest kitsamat kirjatüüpi on lubatud erandkorras vaid väga pikkade kohanimede puhul, kus ruumipiirang ei võimalda kasutada Mittelschrift kirjatüüpi. [45]

Sellest tulenevalt erineb DIN 1451 oluliselt spetsiaalselt liikluskeskkonna jaoks optimeeritud kirjatüüpidest, mille disainis arvestatakse lisaks funktsionaalsusele ka visuaalse taju iseärasusi, nagu tähtede eristatavus, proportsioonid ja loetavus suurelt kauguselt.

Rootsis on liiklusmärkide jaoks välja töötatud kirjatüüp Tratex, mille juured ulatuvad 1960. aastatesse, mil loodi Gepos tähestik osana liiklusmärkide süsteemi uuendamisest. Kirjatüüp töötati välja inseneride poolt eesmärgiga tagada märkide funktsionaalsus ja loetavus kasvava liikluskoormuse ning keerukamate liiklussüsteemide tingimustes.

Liiklusmärkide disainis arvestati, et erinevalt trükitekstist peab märgitekst olema loetav liikumises, erinevate vaatenurkade alt ning muutuvates valgus- ja ilmastikutingimustes. Seetõttu muutus loetavus liiklusmärkide kujundamisel üheks keskseks disainikriteeriumiks.

Oluliseks arenguks Tratex kirjatüübi kujunemisel oli retroreflektiivsete materjalide kasutuselevõtt. Uuringud näitasid, et varasemate kitsamate ja õhemate tähejoontega kirjatüüpide puhul tekkis retroreflektiivsetel märkidel tugev haloefekt, mis muutis tähed öösel raskesti loetavaks. Selle kompenseerimiseks suurendati uues kirjatüübis tähejoonte paksust, et säilitada hea loetavus ka suure heledustasemega tingimustes.

Kirjatüübil töötati välja kaks erineva joonepaksusega varianti, mida kasutati sõltuvalt märgi taustast ja kasutusolukorrast: paksem variant retroreflektiivsetel märkidel suurematel kiirustel liikluses ning õhem variant mitte-reflektiivsetel pindadel aeglasema liikluse, näiteks jalakäijate ja jalgratturite jaoks.[46]

Hetkel on kasutusel Tratexi kirjatüüp nelja erineva stiiliga. TratexSvart on mustad tähed tavaline tekst valgel taustal, TratexVit on valged tähed tumedal taustal, suurtähtede puhul kasutatakse valgel taustal mustad tähed TratexPosVersal ja tumedal taustal TratexNegVersal.[47]

Selline lähenemine näitab, et Tratex kirjatüübi disainis arvestati otseselt optiliste nähtuste ja visuaalse taju eripäradega, mistõttu erineb see üldkasutatavatest kirjatüüpidest ning on optimeeritud liikluskeskkonnale.

Ameerika ühendriikides on aastakümneid kasutatud Standard Highway Series E(M) kirjatüüpe. Need kirjatüübid loodi ajastul, mil liiklusmärgid valmistati madalama heledusastmega materjalidest. Uuemate, suure heledusega retroreflektiivsete materjalide kasutuselevõtuga ilmnesid mitmeid visuaalse tajuga seotud probleemid, millest üks olulisemaid on haloefekt, kus valgus valgub tähejoontest selle siseosadesse ja vähendab märkide loetavust. Sellest probleemist tingituna töötati 1990.aastatel välja Clearview kirjatüüp, mille eesmärk oli parandada liiklusmärkide loetavust. Clearview kujundus põhineb tähtede siseosade avardamisel, mis võimaldab haloefekti esinemisel täita tähe sisemisi alasid ilma, et tähe kuju muutuks raskesti eristatavaks. Läbiviidud uuringu tulemusel täheldati öistes tingimustes kuni 16% pikemaid äratundmiskaugusi võrreldes Standard Highway Series E(M) kirjatüübiga, ilma et märgi üldiseid mõõtmeid oleks suurendatud.[36]

Hilisemad Texase Transpordiinstituudi uuringud täpsustasid Clearview kirjatüübi sobivust eri tüüpi liiklusmärkidele. Oluline on eristada kirjatüübi toimivust sõltuvalt märgi kontrastsusest, kuna Clearview loodi positiivse kontrasti jaoks, kus paikneb hele tekst tumedal taustal. Uuringute kohaselt ei pruugi Clearview pakkuda statistiliselt olulist eelist negatiivse kontrasti puhul, kus tume tekst paikneb heledal taustal. Negatiivse kontrasti korral ei pruugi Clearview pakkuda statistiliselt olulist eelist ning

öistes tingimustes võib see isegi vähendada äratundmiskaugust võrreldes Highway Gothic kirjatüüpidega, juhul kui joone paksust ei ole vastavalt suurendatud.[48]

Rahvusvahelised näited Suurbritanniast, Rootsist ja Ameerika Ühendriikidest näitavad selgelt, et liiklusmärkide jaoks on tarvis kasutada spetsiaalselt selleks otstarbeks välja töötatud kirjatüüpe, mille disain arvestab kiirust, vaatekaugust, kontrastsust ning retroreflektiivsete materjalide optilisi mõjusid. Üldotstarbelised või ajalooliselt kujunenud kirjatüübid, nagu Arial Narrow Bold Eestis või DIN 1451 Saksamaal, ei pruugi tänapäevastes liiklus- ja valgustingimustes tagada optimaalset loetavust. Seetõttu võib järeldada, et kaasaegse teeviida kujundamine nõuab teaduspõhist ja disainikeskset lähenemist kirjatüübi valikule, mitte üksnes ruumilisi või majanduslikke kaalutlusi arvestavat standardlahendust. Eelistada tuleks kirjatüüpe, millel on avaramad proportsioonid, selgelt eristatavad tähekujud ning piisav tähtedevaheline kaugus, et tagada informatsiooni kiire ja usaldusväärne tajumine erinevates keskkonnatingimustes.

### 1.3.3 Tähe- ja reavahed

Kirjatüübi loetavus ei sõltu üksnes üksikute tähtede kujust, vaid määravat rolli mängivad ka tähtede ja ridade vahed. Teksti tajumisel ei taju inimene tähti eraldiseisvate elementidena, vaid näeb neid alati koos naabertähtedega. Kui tähtedevaheline kaugus on ebapiisav, hakkab domineerima nn crowding-efekt, mille korral naabertähed takistavad üksiktähe äratundmist isegi siis, kui tähed ise on piisava suurusega [49]. Seega ei ole loetavusprobleemid alati seotud tähe suurusega, vaid sageli just liiga väikese tähtedevahelise vahega.

Pelli ja kaasautorite uuring näitab, et lugemiskiirus sõltub sellest, kui palju tähti langeb vaataja sellesse vaatevälja ossa, kus need ei häiri üksteise äratundmist. See ala kahaneb märkimisväärselt parafoveaalses ja perifeerses nägemises, kus crowding-efekt muutub määravaks [49]. Praktikas tähendab see, et olukordades, kus tekst ei asu vaataja pilgu tsentris, näiteks liikumisel või kauguselt lugemisel omandavad tähtede ja ridade vahed keskse rolli loetavuse säilitamisel. Kui tähed on liiga tihedalt koos, ei pruugi need olla kiiresti ega täpselt eristatavad.

Samale järeldusele jõuab ka S. Beier, kes rõhutab, et tähtede äratundmine toimub kontekstis ning tähtede omavaheline kaugus mõjutab otseselt loetavust. Tähe- ja reavahede kaudu kujuneb tekstis negatiivse ruumi hulk ehk valge ala, mis aitab silmal eristada nii üksikuid tähti kui ka ridu. Loetavusprobleemid ei avaldu üksnes pideva lugemise korral, vaid ka lühiajalise pilgu ja kiire äratundmise olukordades, kus tekstile ei keskenduta pikemalt. Kui negatiivset ruumi on liiga vähe, hakkavad tähekujud

visuaalselt kokku sulama ning märkide äratundmine muutub aeglasemaks ja ebakindlamaks.[38]

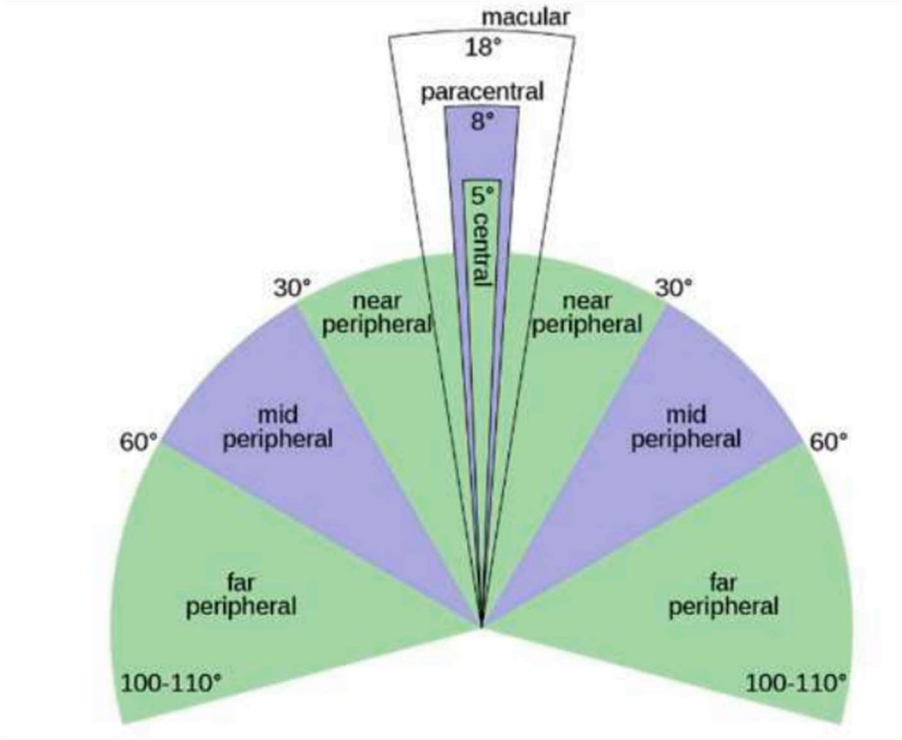
Need nägemisteaduslikud põhimõtted kajastuvad ka tarbekirjade ja avaliku ruumi tähistuste standardiseerimises. Näiteks DIN 1451 standardi puhul ei määratleta üksnes tähekujusid, vaid ka nende paigutust ning minimaalset omavahelist kaugust [50]. Selline lähenemine lähtub vajadusest tagada märkide üheselt mõistetavus olukordades, kus tekst peab olema kiiresti äratuntav ja kus vaatamistingimused on ebastabiilsed. Seetõttu võib järeldada, et õigesti määratud tähe- ja reavahed on loetavuse seisukohalt sama olulised kui kirjatüübi kuju ise, eriti liikluskeskkonnas kasutatavate tekstide puhul.

Seega võib eelneva põhjal eeldada, et Eestis liiklusviitadel kasutatava kitsa kirjatüübi Arial Narrow Bold tähtede proportsioonid ja vähene tähtede vahe võivad soodustada crowding-efekti teket. Kitsas kirjakujundus vähendab nii tähtede siseosade suurust kui ka nendevahelist visuaalset eraldatust, mistõttu üksikute tähtede eristamine muutub raskemaks. See efekt esineb ka päevastes tingimustes ning ei sõltu otseselt retroreflektiivsete materjalide kasutamisest.

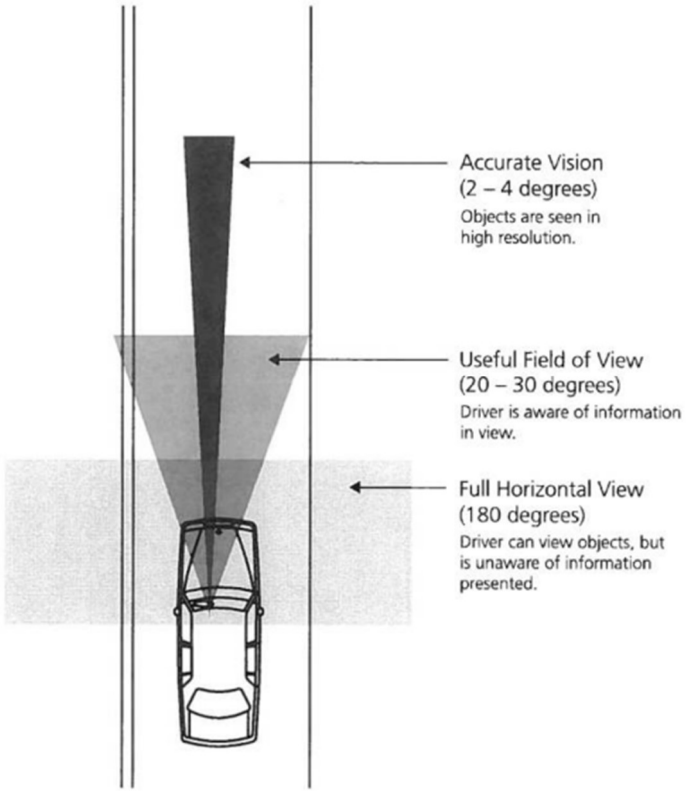
### 1.3.4 Viitade paigutus

Inimese nägemisväli on küllalt lai, horisontaalselt ligikaudu 180 kraadi, kuid funktsionaalselt on vaid väike osa sellest alast võimeline pakkuma täpset ja detailset informatsiooni. Kõrgeima nägemisteravusega foveaalne ala piirdub ligikaudu 2-4 kraadiga ning juba mõni kraad sellest eemale liikudes langeb detailsuse tase. Sõidukijuht tajub teadlikult informatsiooni eeskätt nn kasuliku vaatevälja piires, mis ulatub umbes 20-30 kraadini ning kitseneb oluliselt nii sõidukiiruse suurenemisel kui ka vaimse koormuse kasvades, selles alas on juht veel teadlik informatsioonist ilma silmi või pead pööramata, seda illustreerib joonis 9.[51]

Madalama eraldusvõimega vaatevälja nimetatakse perifeerseks nägemisalaks, kus on küll võimalik huvipakkuvaid objekte märgata, kuid mitte nende detaile täpselt dešifreerida. Sõidukiiruse kasvades muutub ka juhi visuaalne fookuspunkt, pilk suunatakse kaugemale ette, mis pärsib vahetult sõiduki ees ja külgedel toimuvate sündmuste märkamist. Tähelepanu suunamine kaugemale teele võib põhjustada perifeerse nägemise halvenemist ja teeäärsete objektide märkamata jätmist. Seda nähtust tuntakse kui "tunnelnägemine", kuna ahenenud ei ole mitte juhi füsioloogiline vaateväli, vaid tema tähelepanuressurss [51]. See tähendab, et esmane teeviida ja sellel asuva teksti märkamine ja töötlemine toimub perifeerses vaateväljas, kus visuaalne eraldusvõime on madalam, muutes teeviida geomeetrilise paigutuse ja teksti silueti oluliselt tähtsaks.




Joonis 9. Inimese silma vaatevälja laius [51]




Joonis 10. Sõidukijuhil suhteline nägemine perifeerses vaateväljas [51]

Teeviitade paigutuse ja nähtavuse kavandamisel on kriitiline arvestada juhtide dünaamilise nägemisteravuse ja kontrastitundlikkusega, kuna need funktsioonid mõjutavad otseselt märkide loetavust ja tuvastuskaugust. Kiiruse kasvades ja vaatleja suhtelise liikumise korral sihtobjekti suhtes halveneb nägemisteravus märkimisväärselt, kusjuures see kahanemine süveneb oluliselt pärast 40. eluaastat.[51]

Lisaks füüsilisele asukohale ja juhi vanusele mängib olulist rolli viida ja selle tausta vaheline kontrastsus. Kuna paljud liiklusõnnetused on seotud kokkupõrgetega objektidega, mis on oma mõõtmetelt nägemisteravuse piirist tunduvalt suuremad, peetakse kontrastitundlikkust ohutu sõidu seisukohalt olulisemaks kui nägemisteravust. Eriti kriitiline on see madala valgustatusega tingimustes ja eakate juhtide puhul, kelle kontrastitundlikkus on tunduvalt madalam, mis raskendab viitadelt teabe õigeaegset ammutamist. Viitade loetavuskauguse ja märgatavuse suurendamiseks on seetõttu tarvis kasutada kõrge intensiivsusega retroreflektiivseid materjale, mis tõstavad sihtobjekti kontrastsust ümbritseva keskkonna suhtes [51]. Seejuures nagu eelnevalt käsitletud, nõuab selliste materjalide kasutamine teeviitade puhul haloefekti kompenseerivat kirjatüüpi, et suurenenud kontrastsus ei muudaks loetavuse keeruliseks või võimatuks.

Eestis on liiklusmärkide ja viitade paigutuse ning nähtavuse nõuded sätestatud standardis EVS 613:2023, mis kehtestab märkide paigalduskõrgused, vahekaugused ning asukoha valiku sõltuvalt sõidukiirusest ja liikluskeskkonnast. Standardi nõuded lähtuvad põhimõttest, et juhile edastatav teave peab olema nähtav ja loetav nii päevastes kui ka hämarates tingimustes ning piisava etteteatamisajaga, arvestades sõiduki dünaamikat ja juhi taju piiranguid. Samuti on standardis märgitud, et märkide paigutuse puhul tuleb vältida olukordi, kus samaaegselt esitatakse juhile liiga palju visuaalset informatsiooni [30]. Seeläbi kinnitab EVS 613:2023 käesolevas töös käsitletud nägemis- ja tajupõhiste põhimõtete praktilist rakendamist Eesti liikluskeskkonnas.

### 1.3.5 Eesti standardi analüüs

Eesti liiklusmärkide kujundamist ja kasutamist reguleerivad standardid EVS-EN 12899 ning EVS 613:2023, mille peamine eesmärk on tagada liiklusmärkide vormiline ühtsus, arusaadavus ja praktiline rakendatavus kogu Eesti liiklussüsteemis. Standardid määratlevad muu hulgas kasutatava kirjatüübi, märkide mõõtmed ning paigutuspõhimõtted, luues selge normatiivse raamistiku.

Samas keskendub kehtiv regulatsioon eeskätt visuaalse kujunduse tehnilistele ja vormilistele parameetritele, jättes suuresti tähelepanuta inimese visuaalse taju ning

füsioloogilised aspektid. Näiteks ei käsitleta otseselt pimestuse ja valguse hajumise mõju. Tegelikes liiklusoludes võivad vastutulevate sõidukite esituled või suure peegeldavusega retroreflektiivsed pinnad põhjustada kontrasti vähenemist ning detailide hajumist, mis omakorda halvendab visuaalset sooritust. Seetõttu võib märgi loetavus halveneda isegi olukordades, kus selle heledus vastab normatiivsetele nõuetele.

Standard EVS 613:2023 näeb ette, et tähevälja suurus juhatusmärkidel on olenevalt suurtähe kõrgusest erineva hõrendusega, suurtähe kõrgusel 200-300mm on see 45%. Põhimaanteedel on suurtähe kõrgus lubatud kiirusel üle 50 km/h 200mm ja suurendatud lubatud sõidukiirusega teelõikudel vahemikus 110-120 km/h 300mm. Lisaks on ka välja toodud, et RA2 klassi valgustpeegeldavast kilest kirjete loetavuse tagamiseks võidakse tähevälju suurendada mõlemalt poolt 0,05*kõrguse võrra [30]. See tähendab, et standardi koostajad on tähevahede kokkusulamise probleemist teadlikud kõrgeintensiivsusega retroreflektiivse kile kombinatsioonis.

Tugevalt retroreflektiivsete materjalide kasutamisel tekkiv haloefekt põhjustab öistes tingimustes heledate tähejoonte optilist paisumist. Selle tulemusel kipuvad tähtede siseosad visuaalselt kinni sulama, mis halvendab drastiliselt teksti eristatavust. Rahvusvahelised loetavusuuringud on tõestanud, et pelgalt tähevahede suurendamisest selle probleemi lahendamiseks ei piisa. Ameerika Ühendriikide uuringutes leiti, et joonepaksuse visuaalse suurenemise kompenseerimiseks tuleb muuta kirjatüübi anatoomiat. Optimaalse loetavuse saavutamiseks vähendati tähtede sisemist joonepaksust, lõigates sellega tähe siseosadesse füüsiliselt optilist paisumisruumi juurde [52]. Seda printsiipi rakendati edukalt ka spetsiaalselt liikluskeskkonda loodud Clearview kirjatüübi arendamisel, kus tähekujud disainiti teadlikult avaramaks, et jätta valgusele ruumi hajuda. Nende teaduslike põhimõtete valguses on Eesti standardi nõuded problemaatilised. Standardis esimese eelistusena sätestatud Erinevalt rahvusvahelisest praktikast, kus probleem lahendatakse tähe anatoomia avardamisega, püütakse Eesti standardis loetavust kompenseerida vaid tähtedevahelise kauguse ehk hõrenduse kunstliku suurendamisega.

Varasemalt käsitletud vaatevälja ja pilguliikumise põhimõtted näitavad, et liiklusviidad peavad paiknema piirkonnas, kus juht saab need õigeaegselt perifeerses nägemises tuvastada ning seejärel foveaalselt fikseerida. Kui liiklusviit paikneb väljaspool juhi loomulikku vaatevälja, võib see vähendada loetavuskaugust ja reageerimisaega. Seetõttu peavad paigaldusnõuded olema seotud inimese visuaalse taju piirangutega, arvestades seejuures ka sõidukiirust ja liiklusolukorra keerukust.

Ameerika MUTCD standardis käsitletakse põhjalikumalt nende paigaldust, nähtavust ja juhi tajuprotsessi. Standard rõhutab, et märkide asukoht, kõrgus, külgnihe, retroreflektiivsus ja teksti loetavus peavad toetama juhi otsustusprotsessi ning jääma juhi loomulikku vaatevälja. MUTCD standardis pööratakse tähelepanu paigutusele ning informatsiooni hulga piiramisele ja tuuakse välja, et märkide liigne kasutamine võib vähendada nende tõhustst [31]. Praktikas võib Eestis näha olukordi, kus mitu viita ja märki paiknevad lähestikku nii linnakeskkonnas, kui ka keerukatel ristmikel, mis võib suurendada juhi kognitiivset koormust ja raskendada olulise info eristamist

Sellest tulenevalt võiks Eesti standardite arendamisel pöörata rohkem tähelepanu juhi vaatevälja ja informatsiooni tajumise põhimõtetele, samuti oleks otstarbekas täpsustada nõuded maksimaalsele informatsioonihulgale ühe liiklussõlme kohta. Lisaks võiks ka kehtestada põhimõtte, et enne keerukamat ristmikku tuleb juhile anda suunainfo etapiviisiliselt ning piisava etteteatamisajaga, sarnaselt MUTCD lahendustele. Sealhulgas tuleks selgemalt eristada erineva sõidutee klassi viitamisloogikat. Suurematel kiirustel on juhi vaateväli ja reageerimisaeg erinevad, mistõttu oleks vajalik eelviitade kasutamine mitmes etapis enne otsustuskohta.

# 2. PRAKTILINE OSA

## 2.1 Metoodika eesmärk

Käesoleva töö metoodika eesmärk on hinnata, kuidas erinevad kirjatüübi konstruktsioonilised omadused mõjutavad liiklusmärkide loetavust tingimustes, kus visuaalset tajumist häirivad halo- ja ülekiirgamise efektid. Metoodika keskendub kirjatüübi anatoomiale ja detailide säilimisele, lähtudes töö teoreetilises osas käsitletud nägemisfüsioloogia, loetavuse ja tüpograafia põhimõtetest.

Metoodika on suunatud eeskätt standardis määratud kirjatüübi ja valitud võrdlusfontide käitumise analüüsile olukordades, kus ideaalsetest vaatamistingimustest kõrvalekaldumine võib mõjutada märgi informatsiooni tajumist. Analüüsi eesmärk ei ole hinnata liiklusmärkide vastavust kehtivatele normidele, vaid uurida, millised tüpograafilised omadused võivad teatud visuaalsetes tingimustes loetavust piirata või toetada.

Metoodika loob aluse järgnevale analüüsile, milles vaadeldakse kirjatüüpide käitumist kontrollitud visuaalsetes olukordades ning seostatakse saadud tähelepanekud nii teaduskirjanduses kirjeldatud loetavusmehhanismide kui ka Eesti standardite kriitilise käsitlusega.

## 2.2 Kasutatav meetod

Käesolevas töös kasutatakse metoodilise võttena visuaalset simulatsiooni, mille abil imiteeritakse ülekiirgamisega seotud nägemisnähtusi ning võrreldakse nende mõju eri kirjatüüpide loetavusele. Visuaalne simulatsioon võimaldab analüüsida kirjatüüpide käitumist visuaalsete häiringute tingimustes.

Simulatsioon põhineb digitaalselt loodud liiklusmärgi tekstikujutistel, millele rakendatakse visuaalseid töötlusi. Töötluste eesmärk on jäljendada valguse hajumist, kontrasti vähenemist ja tähekontuuride visuaalset laienemist, mida on teoreetilises osas käsitletud haloefekti kontekstis. Rakendatud töötlused ei kujuta endast fotomeetriliselt täpset füüsikalist mudelit, vaid on valitud lähtudes inimese visuaalse taju põhimõtetest ning teaduskirjanduses kirjeldatud tajulistest mõjudest.

Kõik simulatsioonis kasutatud kirjatüübid seatakse identsetele visuaalsetele tingimustele: kasutatakse sama teksti, samu värvikombinatsioone ning samaväärset kujutise mõõtkava. Visuaalseid efekte rakendatakse ühesuguste parameetritega

kõikidele võrreldavatele fontidele, mis tagab tulemuste võrreldavuse ja vähendab subjektiivse tõlgenduse mõju.

Analüüsis keskendutakse loetavuse seisukohalt kriitilistele tunnustele, nagu tähe siseosade säilimine, tähejoonte visuaalne paksenemine ning üksiktähtede ja sõnamustrite eristatavus. Kirjatüüpide käitumist hinnatakse võrdlevalt, lähtudes sellest, kui kaua säilib tähe anatoomiline loogika ja informatsiooni äratundmiseks vajalik struktuur visuaalsete häiringute suurenedes.

Valitud meetod võimaldab seostada teoreetilises osas kirjeldatud loetavusmehhanismid visuaalselt tajutavate praktikajuhtumitega ning toetab Eesti standardite kriitilist käsitlemist. Visuaalne simulatsioon täidab analüütilist ja illustreerivat rolli, aidates teha nähtavaks tüpograafilisi piiranguid ja erinevusi olukordades, mida kehtivad normatiivsed dokumendid otsesõnu ei käsitle.

## 2.3 Visuaalse simulatsiooni teostus

Visuaalse simulatsiooni teostamiseks loodi digitaalsed kujutised, mis imiteerivad liiklusmärgi tekstilist osa. Kõik simulatsioonid põhinevad samadel tekstilistel, värvilistel ja geomeetrilistel parameetritel, kus muutujaks on üksnes kasutatav kirjatüüp ja sellele rakendatud visuaalse häirituse aste, et tagada võrreldavus erinevate kirjatüüpide vahel. Kõikidel juhtudel kasutati sama sõnalist sisu, identset tähekõrgust kõrgusega 200 mm ning ühesugust paigutust. Tekst kujutati kombinatsioonis, kus valge tekst ja sinine taust vastavad liiklusmärkide tavapärasele visuaalsele lahendusele.

Kirjatüüpidena kasutatakse teoreetilises osas kirjeldatud erinevates riikides kasutatavaid kirjatüüpe. Kasutatavaks tekstiks on Rapla, Narva ja Keila, mis sisaldab suletud ja avatud siseosadega tähti, sirgjoonelisi ja ümarvorme kombineerivaid tähekujundeid. Selline valik võimaldab vaadelda, kuidas erinevad täheanatoomilised omadused reageerivad halo- ja ülekiirgamise efektidele ning millisel määral säilib tähtede eristatavus. Kõik kirjatüübid esitatakse võrreldavates tingimustes, kasutades identset teksti suurust ja joondust, et välistada suurusest või paigutusest tulenevaid erinevusi.

Visuaalse häiringu modelleerimiseks rakendati kujutistele järkjärgulisi digitaalseid töötlusi, mille eesmärk oli imiteerida haloefektiga seotud nähtusi. Töötlused viidi läbi pilditöötlusvahendite abil, kasutades mitmekihilist lähenemist. Efekti loomiseks kasutati mitu paralleelset kihti, millele lisati hajusfilter ja välishelenduse efekt. Kihtide läbipaistvust varieeriti, et saavutada valguse hajumise kujutis.

Standardi EVS-EN 12899-1:2007 kohaselt on liiklusmärkide värvused defineeritud CIE x,y koordinaatide ja heledusteguri piirväärtuste kaudu [53]. Praktiliste digitaalsete simulatsioonide teostamiseks on antud töös taustavärvina kasutatud värvitooni RAL 5017 Traffic blue, mille digitaalne vaste on HEX #005B8C. Seda värvitooni kinnitab ka Orafol Europe GmbH spetsifikatsioon, nende spetsiaalselt liiklusmärkidele tootmiseks arendatud digitaaltrüki tint Oralite 5017 .[54]

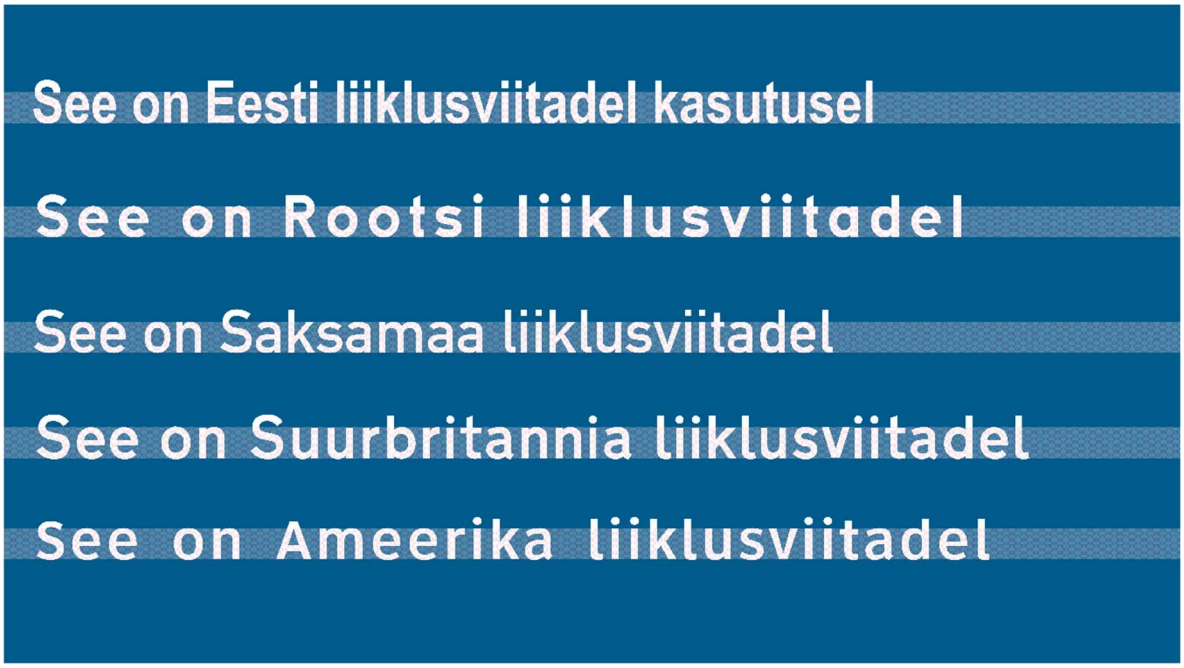
## 2.4 Visuaalse simulatsiooni tulemused ja võrdlev analüüs

Käesolevas alapeatükis esitatakse visuaalse simulatsiooni tulemused ning võrreldakse erinevate kirjatüüpide käitumist halo- ja ülekiirgamise tingimustes. Analüüs keskendub tähe anatoomiliste tunnuste säilimisele ning eristatavuse muutumisele visuaalse häiringu suurenedes.

Kuigi tegelikus liikluskeskkonnas on valguse hajumine ebaühtlane ja mõjutatud mitmetest juhuslikest teguritest, kasutati käesolevas töös Adobe Illustrator ja Adobe Photoshop programme. Adobe Illustratorit kasutati kirjatüüpide geomeetriliseks võrdlemiseks ja standardiseeritud lähtekujutise loomiseks, vektorpõhine töökeskkond võimaldas kontrollida erinevate kirjastiilide proportsioone ilma rasteriseerimisest tulenevate moonutusteta. Täiendavalt demonstreeriti ülekiirgamise efekti Adobe Photoshop rasterpõhises keskkonnas.



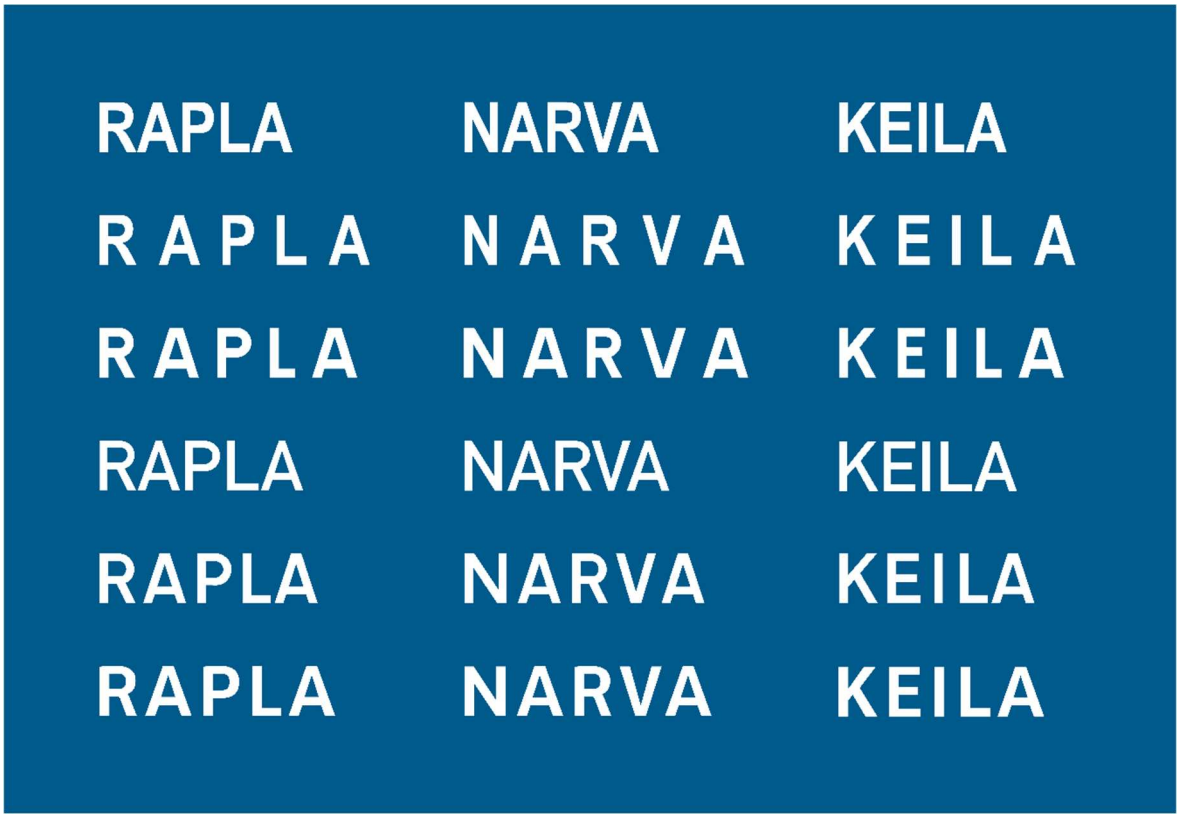

Joonis 11. Erinevad kirjatüübid




Joonis 12. Erinevad kirjatüübid ruudulise taustaga

Joonisel 11 on esitatud erinevates riikides kasutatavate liiklusviitade kirjatüüpide visuaalne vaade. Joonisel 12 on taustale lisatud ruuduline ristkülik tähistamaks, et kirjatüübid on ühtse kõrgusega. See on vajalik, kuna sama kirjasuurus ( nt suurus 10) ei taga eri kirjatüüpide puhul võrdset tähekõrgust. Jooniselt selgub, et kirjatüübid erinevad nii tähtede proportsioonide kui ka tähevälja suuruse poolest. Rootsis kasutatav kirjatüüp on märgatavalt suurema hõrendusega võrreldes Eestis kasutatava Arial

Narrow Bold kirjatüübiga, mille tulemusena on tekst visuaalselt õhulisem ja tähed selgemalt eristatavad. Ameerika ja Suurbritannia lahendustes on tähed paigutatud tihedamalt, mistõttu tekst moodustab kompaktse visuaalse terviku.




Joonis 13. Erinevate kirjatüüpidega kohanimed enne haloefekti rakendamist

Joonisel 13 on esitatud katse lähteandmed, mille alusel hinnatakse kirjatüüpide loetavust haloefekti tingimustes. Iga rida on erineva kirjatüübiga ja ilma täiendavate visuaalsete efektideta, et tuua esile erinevused enne edasist töötlust. Esimene rida on Arial Narrow Bold ilma hõrenduseta, teine rida on standardi järgse 45% hõrendusega. Kolmas rida on TratexNegVersal, neljas DIN1451 MittelSchrift, viies Transport Medium ja kuues ClearviewHwy 5-W.

Jooniselt on näha, et kirjatüübid erinevad märkimisväärselt tähtede proportsiooni, joonepaksuse, kui ka tähevälja suuruse poolest. Mõned kirjatüübid on kitsamad ja kompaktsemad, tähed paiknevad üksteisele lähemal ja samas teised on suurema hõrendusega ning visuaalselt õhulisemad. Sellised erinevused mõjutavad juba ilma täiendavate efektideta tähtede eristatavust ning on määravad, kui tundlik on tekst haloefekti suhtes.

Rootsis kasutatav Tratex paistab silma suuremate täheväljade ja avarama kirjapildiga, üksiktähtede eristatavus säilib seetõttu ka tihedama sõnamustri korral. Suurbritannias kasutatav Transport kirjatüüp sisaldab pehmeid ja optiliselt avaraid tähevorme.

Ameerika Ühendriikides kasutatav Clearview on kujundatud eesmärgiga parandada tähtede siseosade loetavust ja ka erineb teistest kirjatüüpidest ümaramate tähevormide ja avarate siseavade poolest.




Joonis 14. Erinevad kirjatüübid haloefekti tingimustes

Joonisel 14 on kujutatud erinevates riikides kasutatavad liiklusviitade kirjatüübid pärast visuaalse haloefekti rakendamist Adobe Illustratoris. Võrreldes eelneva, ilma häiringuta kujutisega on näha, et valgus hajub tähe servadest väljapoole, põhjustades kontuuride visuaalse laienemise. Selle tulemusena väheneb kontrast tähe ja tausta vahel ning tähtede vahelised piirid muutuvad vähem selgeks. Kõikidele kirjastiilidele rakendati samad visuaalsed töötlusparameetrid, et tagada tulemuste võrreldavus.

Eestis kasutatav Arial Narrow Bold hakkab moodustama kompaktset valgusmassi, kuna tähtede vahed on suhtelised väikesed ja tähevormid kitsad. Tähekontuuride laialivalgumise tulemusena väheneb üksiktähtede eristatavus ning sõna tajumine hakkab üha enam sõltuma sõnakujust. 45% hõrenduse rakendamisel suureneb tähtedevaheline eraldatus ja loetavus säilib kauem, kuid samal ajal muutub sõna tervik hajusamaks ning kompaktsus väheneb.

Tratex kirjatüüp säilitab suhteliselt hea tähtede eristatavuse. Kirjapilt on avaram kuid haloefekti mõjul hakkavad tähe siseosad osaliselt kokku sulanduma.

DIN 1451 Mittelschrift moodustab geomeetriliselt ühtlase ja tasakaalustatud sõnamustri, kuid suhteliselt kitsaste tähevahede tõttu hakkavad tähevormid tugevama halo korral optiliselt lähenema.

Transport kirjatüüp säilitab pehmema ja avarama sõnakuju, kus tähevormid püsivad hästi eristatavad ning tähe siseosad ja kontuurid jäävad küllalt selgeks. Sarnane tulemus ilmneb ka ClearviewHwy kirjatüübi puhul, mille ümaramad ja avatumad tähevormid aitavad vähendada visuaalse täitumise mõju.

Tulemused viitavad sellele, et kirjatüübi geomeetria, tähevahed ja siseosade avatus mõjutavad oluliselt seda, kui kiiresti hakkab visuaalne ülekiirgamine vähendama liiklusviida loetavust Seetõttu sõltub loetavus olulisel määral kasutatava kirjatüübi valikust. Haloefekti tingimustes muutub oluliseks mitte ainult üksiktähtede kuju, vaid ka kogu sõnamustri optiline ülesehitus ning selle võime säilitada eristatavus suurenenud heleduse korral.

Kuigi rakendatud hajusfiltri parameetrid olid kõikidel kirjatüüpidel võrdsed, ei avaldu haloefekt kõigis kirjatüüpides ühesuguselt. Erinevus tuleneb tähe geomeetriast ja elementide omavahelisest paiknemisest. Näiteks horisontaalsete joonte piirkonnas võib haloefekt tugevneda, kui läheduses paiknevad teised heledad pinnad, mille hajumine kattub. Selle tulemusena toimub valgusintensiivsuse summeerumine, mis muudab halo visuaalselt tugevamaks.




Joonis 15. Kirjatüübid haloefekti tingimustes

Joonisel 15 on esitatud samad kirjatüübid ja tekstinäited, millele on rakendatud haloefekt Adobe Photoshop keskkonnas. Võrreldes Illustratoris loodud simulatsiooniga on Photoshopis tekitatud halo märgatavalt Intensiivsem ning valguse hajumine tugevam.

Rasterpõhise töötluse tõttu muutub haloefekt pehmemaks ja optiliselt on see loomulikum. Halo ei teki üksnes tähe kontuuri ümber, vaid levib sujuvamalt ka sisemiste ja välimiste piiralade vahel. Kontuurid on vähem kontrastsed ning sõnamuster muutub üha domineerivamaks. Erinevalt vektoripõhisest Illustratorist iseloomustab Photoshop tulemust ühtlasem heleduse jaotus. Haloefekt ei avaldu ainult servades, vaid mõjutab kogu tähepinda.

Ka siin variandis ilmneb, et haloefekti mõju sõltub kasutavast kirjatüübist. Suurema hõrenduse ja avaramate siseosade korral säilib loetavus paremini. Photoshopis esineb halo varieerumine selgemalt tähe erinevates osades. Läheduses paiknevate heledate pindade hajumine kattub ning põhjustab valguse summeerumist. See kinnitab, et haloefekti visuaalne tugevus sõltub tähe geomeetriast ja selle elementide omavahelist paiknemist.

# KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli analüüsida Eesti liiklusviitade loetavust mesoopilistes ja halvenenud nähtavustingimustes kirjatüübi ja ülekiirgamise ehk haloefekti nähtuse kontekstis ning hinnata, kas Eestis kasutatav lahendus tagab piisava loetavuse.

Töö teoreetilises osas käsitleti inimese nägemisfüsioloogia aluseid, sealhulgas skotoopilist, mesoopilist ja fotoopilist nägemist ning nende mõju visuaalse informatsiooni tajumisele liikluskeskkonnas. Analüüsiti kontrasti, pimestuse ja valguse hajumise mõju nägemisele ning kuidas kõrge retroreflektiivsed materjalid võivad põhjustada haloefekti ja vähendada liiklusviitade loetavust. Käsitleti ka retroreflektsiooni füüsikalisi põhimõtteid. Samuti käsitleti kirjatüüpide geomeetriat, tähtedevahelist mõju ja eri riikides kasutavaid kirjatüüpe liiklusviitadel.

Praktilises osas koostati visuaalsed simulatsioonid eesmärgiga võrrelda erinevate kirjatüüpide käitumist ülekiirgamise tingimustes. Simulatsioonid viidi läbi kontrollitud tingimustes, kasutades identseid tekste, värvilahendusi ja töötlusparameetreid, et tagada tulemuste võrreldavus. Adobe Illustrator võimaldas luua kontrollitud vektorpõhiseid simulatsioone ja Adobe Photoshopis modelleeriti realistlikumat valguse hajumist ja valguse üleküllastumist, mis sarnaneb olukorrale, kus retroreflektiivne liiklusviit sõiduki esitulede valgusvihus peegeldub.

Töö käigus võrreldi Eestis kasutatavat Arial Narrow Bold kirjastiili ilma hõrendamiseta ja 45% standardijärgse hõrendusega 200 mm  korral, Rootsi Tratex'i, Saksamaa DIN 1451, Suurbritannia Transport'i ning Ameerika Ühendriikides kasutatava Clearview kirjatüüpi. Tulemused näitasid selgelt, et kirjatüüpide loetavus haloefekti tingimustes erineb märgatavalt. Eestis kasutatav Arial Narrow Bold osutus visuaalse hajumise suhtes tundlikumaks, kuna kitsad tähevormid ja hõrenduseta versioonil väiksed tähevahed põhjustasid tähtede optilist kokku sulandumist ning üksiktähtede eristatavus vähenes. 45% hõrendus parandab küll eristatavust ja vähendab haloefekti mõju, kuid ei kõrvaldanud täielikult kirjatüübi kitsastest proportsioonidest tulenevaid probleeme, tähtede väikeste siseosade tõttu on see tundlik.

Võrdluses teiste riikide kirjatüüpidega ilmnes, et suuremate täheväljade ja avarama geomeetriaga kirjatüübid säilitavad loetavuse paremini haloefekti tingimustes. Samuti näitas simulatsioon, et kirjatüübi geomeetria mõjutab haloefekti tugevust, kuna valguse hajumine sõltub täheelementide omavahelisest paiknemisest ja nende kattumisest.

Töö tulemuste põhjal võib järeldada, et liiklusviitade loetavust ei määra üksnes retroreflektiivsest materjalist, vaid olulist rolli mängivad kirjatüübi geomeetria, tähevahed, tähe siseosade avatus ning inimese nägemissüsteemi füsioloogilised

piirangud mesoopilistes tingimustes. Suure retroreflektiivsusega materjalid võivad küll parandada märkide märgatavust, kuid samal ajal vähendada teksti loetavust.

Käesoleva töö põhjal võib järeldada, et Eestis kasutatava liiklusviitade kirjatüüp ei ole nende tingimuste jaoks optimaalselt sobiv lahendus, mistõttu võiks kaaluda kirjatüübi muutmist või selle korrigeerimist loetavuse parandamiseks.

Autori hinnangul kinnitab töö, et kehtiv standard ei arvesta piisavalt inimese nägemise füsioloogilisi eripärasid ega tänapäevaste retroreflektiivsete materjalide optilisi mõjusid. Kasutatava kirjatüübi asendamine avarama geomeetriaga kirjatüübiga võimaldaks parandada Eesti liiklusviitade loetavust.

Antud töös ei viidud läbi katseid reaalses liikluskeskkonnas ega hinnatud loetavust kvantitatiivselt reaktsiooniaja või tegeliku loetavuskauguse kaudu. Seetõttu tuleks edasiste uuringute käigus viia läbi katseid dünaamilistes liiklusoludes, et hinnata loetavuskauguse muutusi erinevate kirjatüüpide ja retroreflektiivsete materjalide kombinatsioonide korral. Samuti oleks oluline uurida erinevate vanuserühmade tajuerinevusi haloefekti tingimustes, kuna vananemisega seotud nägemise muutused võivad loetavust oluliselt mõjutada.

Autori hinnangul täitis töö püstitatud eesmärgid ning võimaldas siduda nägemisfüsioloogia, valguse füüsika ja liiklusviitade tüpograafilise kujunduse üheks terviklikuks analüüsiks. Töö tulemused näitavad, et kirjatüübi valikul võib olla otsene mõju liiklusohutusele, eriti hämarates tingimustes.

# SUMMARY

The objective of this thesis was to analyse the readability of traffic guide signs in Estonia under mesopic and degraded visibility conditions, focusing on the effects of typeface design and optical irradiation, commonly referred to as the halo effect, and to evaluate whether the current solution used in Estonia ensures adequate readability.

The theoretical part of the thesis addressed the fundamentals of human visual physiology, including scotopic, mesopic and photopic vision, and their influence on the perception of visual information in traffic environments. The effects of contrast, glare, and light scattering on vision were analysed, as well as how highly retroreflective materials may contribute to the halo effect and reduce the readability of traffic signs. In addition, the physical principles of retroreflection were reviewed. The geometric characteristics of typefaces, letter spacing, and the typefaces used in different countries were also examined.

The practical part of the study involved the creation of visual simulations aimed at comparing the behaviour of different typefaces under halo conditions. The simulations were conducted under controlled conditions using identical text content, colour schemes and processing parameters to ensure comparability of results. Adobe Illustrator was used to create controlled vector based simulations, while Adobe Photoshop was applied to model a more realistic representation of light scattering and luminance saturation, resembling situations in which retroreflective traffic signs are illuminated by vehicle headlights.

During the study, the typeface Arial Narrow Bold used in Estonia was analysed both without spacing and with the standard 45% spacing applied at a capital letter height of 200 mm. This was compared with Tratex (Sweden), DIN 1451 (Germany), Transport (United Kingdom), and Clearview (United States). The results clearly indicated that the readability of typefaces varies significantly under halo effect conditions. The Arial Narrow Bold typeface used in Estonia proved to be more sensitive to visual scattering, as its narrow letterforms and small letter spacing in the unspaced version caused optical merging of characters and reduced the distinguishability of individual letters. Although a 45% increase in letter spacing improved readability and reduced the impact of the halo effect, it did not fully eliminate the limitations arising from the narrow proportions and small internal letter spaces.

In comparison with typefaces used in other countries, it became evident that typefaces with larger letter spacing and more open geometry maintain better readability under halo effect conditions. The simualisations also demonstrated that the geometry of the

typeface influences the intensity of the halo effect, as light scattering depends on the spatial relationship between letter elements and their overlap.

Based on the results of this study, it can be concluded that the readability of traffic guide signs is not determined solely by the retroreflective material, but is also significantly influenced by typeface geometry, letter spacing, the openness of internal letter spaces, and the physiological limitations of the human visual system under mesopic conditions. While highly retroreflective materials may improve the visibility of signs, they may simultaneously reduce text readability.

The findings suggest that the typeface currently used on traffic guide signs in Estonia is not optimally suited for such conditions and therefore consideration should be given to modifying or replacing the typeface in order to improve readability.

In the author's opinion, the study confirms that the current standard does not sufficiently take into account the physiological characteristics of human vision nor the optical effects of modern retroreflective materials. Replacing the currently used typeface with one featuring a more open geometric structure could improve the readability of traffic guide signs in Estonia.

This study did not include experiments conducted in real traffic environments, nor was readability assessed quantitatively in terms of reaction time or actual reading distance. Therefore, further research should include field experiments in dynamic traffic conditions in order to evaluate changes in readability distance for different combinations of typefaces and retroreflective materials. It would also be important to investigate perceptual differences between different age groups under halo conditions, as age-related changes in vision may significantly affect readability.

In the author's opinion, the objectives of the thesis were achieved and the study enabled the integration of visual physiology, light physics, and the typographic design of traffic signs into a coherent analysis. The results indicate that the choice of typeface can have a direct impact on traffic safety, particularly under low-light conditions.

# KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] H. W. Leibowitz ja D. A. Owens, „Nighttime Driving Accidents and Selective Visual Degradation", *Science*, kd 197, nr 4302, lk 422–423, 1977.

[2] P. L. Olson, „Driver Perception Response Time", *SAE Trans.*, kd 98, lk 851–861, 1989.

[3] E. Bruce Goldstein, Laura Cacciamani, „Sensation and Perception: 11th Edition Textbook", studylib.net. Vaadatud: 17. märts 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://studylib.net/doc/27755695/e.-bruce-goldstein--laura-cacciamani---sensation-and-perc...

[4] Commission Internationale de l'Eclairage, „Recommended system for visual performance based mesopic photometry", Commission Internationale de l'Eclairage, TC1-58, 2009. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.igov.nl/images/stories/content/documenten/tc1_58_complete_draft2_31.8.091.pdf

[5] S. Anstis, „The Purkinje rod-cone shift as a function of luminance and retinal eccentricity", *Vision Res.*, kd 42, nr 22, lk 2485–2491, okt 2002, doi: 10.1016/S0042-6989(02)00267-5.

[6] C. Owsley, „Aging and vision", *Vision Res.*, kd 51, nr 13, lk 1610–1622, juuli 2011, doi: 10.1016/j.visres.2010.10.020.

[7] H. W. Leibowitz ja D. A. Owens, „Nighttime Driving Accidents and Selective Visual Degradation", *Science*, kd 197, nr 4302, lk 422–423, juuli 1977, doi: 10.1126/science.197.4302.422.b.

[8] D. G. Pelli ja P. Bex, „Measuring contrast sensitivity", *Vision Res.*, kd 90, lk 10–14, sept 2013, doi: 10.1016/j.visres.2013.04.015.

[9] J. J. Vos, „On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation", *Clin. Exp. Optom.*, kd 86, nr 6, lk 363–370, 2003, doi: 10.1111/j.1444-0938.2003.tb03080.x.

[10] M. C. Puell ja C. Palomo-Álvarez, „Effects of Light Scatter and Blur on Low-Contrast Vision and Disk Halo Size", *Optom. Vis. Sci.*, kd 94, nr 4, lk 10.1097/OPX.0000000000001019, 2017, doi: 10.1097/OPX.0000000000001061.

[11] „The Cost of Cool: Typographic Style Legibility in Reading at a Glance - Ben D. Sawyer, Jonathan Dobres, Nadine Chahine, Bryan Reimer, 2017". Vaadatud: 29. märts

2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1541931213601698

[12] A. A. S. Sewall, S. A. W. Borzendowski, ja R. A. Tyrrell, „The Accuracy of Drivers' Judgments of the Effects of Headlight Glare on Their Own Visual Acuity", *Perception*, kd 43, nr 11, lk 1203–1213, nov 2014, doi: 10.1068/p7814.

[13] P. Schreier ja A. Niemeyer, „Side effects of glare-free high beam systems – A study about self glare by retroreflection on street signs", 2015.

[14] M. Wu, „Light scattering in worn windscreens – development of technique for quantitative measurement of visibility degradation".

[15] C. Clifton *et al.*, „Eye movements in reading and information processing: Keith Rayner's 40 year legacy", *J. Mem. Lang.*, kd 86, lk 1–19, jaan 2016, doi: 10.1016/j.jml.2015.07.004.

[16] S. T. Chrysler, „Nighttime Legibility of Ground-Mounted Traffic Signs as a Function of Font, Color, and Retroreflective Sheeting Type".

[17] F. Schieber, „Effects of Driving Speed and Sign Reflectance on Nighttime Highway Sign Legibility Distance and Reading Time Requirements - Frank Schieber, 2005", *Sage J.*, sept 2005, Vaadatud: 2. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/154193120504902209

[18] P. D'Addario ja B. Donmez, „The effect of cognitive distraction on perception-response time to unexpected abrupt and gradually onset roadway hazards", *Accid. Anal. Prev.*, kd 127, lk 177–185, juuni 2019, doi: 10.1016/j.aap.2019.03.003.

[19] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicines, *Diagnostic Assessment and Countermeasure Selection: A toolbox for Traffic Safety Practitioners*. 2024. doi: 10.17226/27890.

[20] Transpordiamet ja Kliimaministeerium, „Liiklusohutusprogramm 2026-2035", Tallinn, 2025.

[21] H. Leibowitz ja D. Owens, „Nighttime Driving Accidents and Selective Visual Degradation", *Science*, kd 197, lk 422–3, aug 1977, doi: 10.1126/science.197.4302.422-a.

[22] P. R. Boyce, *Human factors in lighting*, 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

[23] W. E. K. Middleton, *Vision Through the Atmosphere*. Place of publication not identified: University of Toronto Press, 2017.

[24] P. Andreea-Livia, B. Adrian, R. Carmen, P. Horațiu, ja R. Adrian, „Techniques Implemented by Road Signal Analysis at National Level", *Romanian J. Transp. Infrastruct.*, kd 14, nr 2, lk 1–23, veebr 2026, doi: 10.2478/rjti-2025-0011.

[25] G. Sauter, „White Paper: Minimum Brightness of Retroreflective Traffic Signs to Serve the Entire Driving Population".

[26] G. W. Flintsch, „Review of retroreflective sign sheeting materials, practices and policies." Vaadatud: 16. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://rosap.ntl.bts.gov

[27] European Organisation for Technical Assessment, „European Assessment Document for microprismatic retro-reflective sheetings", EOTA, Brussels, EAD 120001-01-0106. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.eota.eu/download?file=/2016/16-12-0042/ead%20for%20ojeu/ead%20120001-01-0106_ojeu2016c.pdf

[28] J. Nance ja T. D. Sparks, „From streetlights to phosphors: A review on the visibility of roadway markings", *Prog. Org. Coat.*, kd 148, lk 105749, nov 2020, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105749.

[29] L. J. Hrabánek ja M. Růžička, „Retroreflection of traffic signing for the safe operation of agricultural machinery", *Res. Agric. Eng.*, kd 68, nr 1, lk 1–8, jaan 2022, doi: 10.17221/49/2021-RAE.

[30] „EVS 613:2023", EVS. Vaadatud: 16. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.evs.ee/et/evs-613-2023

[31] „MUTCD 11th Edition - FHWA MUTCD". Vaadatud: 8. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://mutcd.fhwa.dot.gov/kno_11th_Editionr1.htm#comp

[32] United Nations Economic Commission for Europe, „Retro-Reflective devices", UNECE, GRE-83-27e, 2020. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2020/wp29gre/GRE-83-27e.pdf

[33] H. Jr ja H. Gene, „Research on Traffic Sign Retroreflective Sheeting Performance: A Synthesis of Practice". Vaadatud: 16. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://rosap.ntl.bts.gov

[34] „(PDF) Factors Affecting Sign Visibility, Conspicuity, and Legibility". Vaadatud: 16. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.researchgate.net/publication/320604763_Factors_Affecting_Sign_Visibility_Conspicuity_and_Legibility

[35] A. J. Holick ja P. J. Carlson, „Nighttime Guide Sign Legibility for Microprismatic Clearview Legend on High Intensity Background“, Texas Department of Transportation, FHWA/TX-04/0-1796-4, sept 2023. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://library.ctr.utexas.edu/hostedpdfs/tti/0-1796-4.pdf

[36] P. Garvey, M. Pietrucha, ja D. Meeker, „Effects of Font and Capitalization on Legibility of Guide Signs“, *Transp. Res. Rec.*, kd 1605, lk 73–79, jaan 1997, doi: 10.3141/1605-09.

[37] J. D. Bullough, N. P. Skinner, ja C. P. O'Rourke, „LEGIBILITY OF URBAN HIGHWAY TRAFFIC SIGNS USING NEW RETROREFLECTIVE MATERIALS“, *TRANSPORT*, kd 25, nr 3, lk 229–236, sept 2010, doi: 10.3846/transport.2010.28.

[38] Sofie Beier, „Typeface Legibility: Towards Defining Familiarity“, Royal College of Art, 2009. Vaadatud: 19. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.researchgate.net/publication/281745318_Typeface_Legibility_Towards_defining_familiarity

[39] S. Beier *et al.*, „Readability Research: An Interdisciplinary Approach“, *Found. Trends® Human–Computer Interact.*, kd 16, nr 4, lk 214–324, dets 2022, doi: 10.1561/1100000089.

[40] S. Elbardawil, „Legibility research of highway signage typefaces: A critical review and a potential design-centred approach“, *Des. J.*, kd 25, nr 1, lk 86–103, jaan 2022, doi: 10.1080/14606925.2021.2004716.

[41] S. Beier ja C. A. T. Oderkerk, „Smaller visual angles show greater benefit of letter boldness than larger visual angles“, *Acta Psychol. (Amst.)*, kd 199, lk 102904, aug 2019, doi: 10.1016/j.actpsy.2019.102904.

[42] S. Beier, C. A. T. Oderkerk, B. Bay, ja M. Larsen, „Increased letter spacing and greater letter width improve reading acuity in low vision readers“, *Inf. Des. J.*, kd 26, nr 1, lk 73–88, juuli 2021, doi: 10.1075/idj.19033.bei.

[43] „Traffic Signs Manual, Chapter 7: The Design of Traffic Signs“, Department for Transport, London, 2018. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.gov.uk/government/publications/traffic-signs-manual

[44] M. Lommen, „Standards for Lettering: NEN 3225.“, *Quaerendo*, kd 53, nr 1, lk 23–39, jaan 2023, doi: 10.1163/15700690-20231158.

[45] Ministerium für Infrastruktur und Raumordnung des Landes Brandenburg, „Hinweise zur wegweisenden Beschilderung für den Radverkehr im Land Brandenburg“,

Land Brandenburg, Potsdam, 2008. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://mil.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/HBR%20gesamt-min.pdf

[46] „Tratex: A Road Sign Alphabet In The Making", Lineto.com. Vaadatud: 20. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://lineto.com/articles/tratex

[47] „Teckensnitt - Transportstyrelsen". Vaadatud: 4. mai 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/trafikregler-och-vagmarken/trafikregler/om-vagmarken/teckensnitt/

[48] Holick, Andrew J.; Chrysler, Susan T.; Park, Eun Sug; Carlson, Paul J., „Evaluation of the Clearview Font for Negative Contrast Traffic Signs", Texas Transportation Institute, College Station, Texas, FHWA/TX-06/0-4984-1, 2006. [Online]. Kättesaadav aadressil: http://tti.tamu.edu/documents/0-4984-1.pdf

[49] D. G. Pelli, K. A. Tillman, J. Freeman, M. Su, T. D. Berger, ja N. J. Majaj, „Crowding and eccentricity determine reading rate", *J. Vis.*, kd 7, nr 2, lk 20, okt 2007, doi: 10.1167/7.2.20.

[50] M. Lommen, „Standards for Lettering: NEN 3225.", *Quaerendo*, kd 53, nr 1, lk 23–39, jaan 2023, doi: 10.1163/15700690-20231158.

[51] Tsyganov, Alexei, *Human Factors in Traffic Safety for Highway and Traffic Engineers*. Driving-related visual functions. Elsevier, 2025.

[52] H. G. H. Jr, „Legibility Comparison of Three Freeway Guide Sign Alphabets", Texas Transportation Institute, FHW AffX-99/1276-lF, 1999.

[53] „EVS-EN 12899-1:2007", EVS. Vaadatud: 8. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.evs.ee/et/evs-en-12899-1-2007

[54] „Orafol - ORALITE® 5017 ECO Traffic Ink". Vaadatud: 26. aprill 2026. [Online]. Kättesaadav aadressil: https://www.orafol.com/en/europe/products/oralite-5017-eco-solvent-digital-printing-ink