

Eesti tingimustele vastava betoonkatendi projekteerimine ja selle tasuvusanalüüs

Ramboll Eesti AS

2013-7



MAANTEEAMET

Tallinn 2013

Tellijä
Maanteeamet

Dokumendi tüüp
Aruanne

Kuupäev
September 2013

Projekti nr
2013-048

EESTI TINGIMUSTELE VASTAVA BETOONKATENDI PROJEKTEERIMINE JA SELLE TASUVUSANALÜÜS **ARUANNE**



Versioon **1.0**
Printimise **2013/10/07**
kuupäev
Koostatud: **Ain Kendra, Peeter Škepast, Pekka Ala-Tuuhonen**
Kontrollitud: **Merle Pabbo**
Kooskõlastatud: **Taavi Tõnts**

Projekti nr 2013-048

SISUKORD

1.	SISSEJUHATUS	4
2.	BETOONKATENDID LÄHIRIIKIDES	5
2.1.	Kempele, Soome	6
2.2.	Lakalaiva, Soome	6
2.3.	Falkenberg, Rootsi	10
2.4.	Eskilstuna, Rootsi	11
2.5.	Uppsala, Rootsi	12
2.6.	Teised näited	19
2.7.	Kogutud tähelepanekud	19
2.7.1.	Üldosa	19
2.7.2.	Materjalid ja konstruktsioonid	20
2.7.3.	Ehituse eripärad	21
2.7.4.	Ekspluatatsiooniomadused	22
2.7.5.	Naastrehvide mõju katendi kulumisele. Deformatsioon	23
2.8.	Kokkuvõtte senistest kogemustest	25
3.	EESTI OLUDESSE SOBIVAD BETOONKATENDI TÜÜBID	26
3.1.	Võrreldavad konstruktsioonid	26
3.1.1.	Betoonkatend ilma asfaltbetoonist kulumiskihita (tüüp BET)	26
3.1.2.	Katend betoonkihiga ja asfaltbetoonist kulumiskihiga (tüüp AB+BET)	27
3.1.3.	Asfaltbetoonkatend (tüüp AB)	28
3.2.	Liiklussagedus ja koormusintensiivsus ning prognoos	28
3.3.	Katendi kulumiskiirus	29
4.	TASUVUSARVUTUSED	31
4.1.	Meetod ja eeldused	31
4.2.	Lähteandmed	31
4.2.1.	Ehitusmaksumus	31
4.2.2.	Perioodilise hoolde olemus ja maksumus	32
4.2.3.	Muud võrreldavad maksumused	33
4.3.	Tasuvusarvutuse tulemused	34
4.4.	Tundlikkusanalüüs	34
4.5.	Naastrehvide keelustamise mõju	35
4.6.	Liikluskooormuse mõju katendikonstruktsioonidele	36
4.7.	Kokkuvõtte	37
5.	BETOONTEE LÕIKUDE VALIK EESTIS	38
6.	SOOVITUSED EDASPIDISEKS TEGEVUSEKS	41
7.	KOKKUVÕTE	42
8.	SUMMARY	43
9.	KASUTATUD KIRJANDUS	44

LISAD

- Lisa 1. 2012 suure liikluskooormusega riigiteede lõigud
- Lisa 2. Koormusprognoosi alternatiivid
- Lisa 3. Asfaltbetoonist katendikonstruktsioonide arvutused
- Lisa 4. Tasuvusarvutuses kasutatud lähteandmed

1. SISSEJUHATUS

Käesoleva töö eesmärgiks on selgitada välja, kas Eestis on betoonkattega teede ehitamine majanduslikult tasuv.

Vastavalt lähteülesandele tuleb töö käigus projekteerida kaasaegne betoonkatend ning selle põhjal koostada majanduslik tasuvusanalüüs võrdluses asfaltbetoonkatendiga ja leida liiklussagedus, millest alates on betoontee ehitamine tasuv.

Töö ülesandeks on samuti kaardistada teelõigud, kus betoonkatendi ehitamine oleks põhjendatud.

Töö käigus tuleb välja tuua riskid, mis kaasnevad betoontee ehituse ja ekspluatatsiooniga.

Tänu abi eest uuringu teostamisel: Arvo Tinni (Austraalia, Tinni Management Consulting) ning Kari Sivula (Soome, Rudus Oy)

2. BETOONKATENDID LÄHIRIIKIDES

Vastavalt lähteülesandele tuleb lähiriikidest (vähemalt 2 riigist), kus on kasutusel naastrehvid (Rootsi, Soome, Norra), leida vähemalt 5 betoonkattega teelõiku (igaüks min 5 km), mis on ehitatud viimase 40 aasta jooksul (st alates 1973.aastast). Analüüsida tuleb alljärgnevaid teemasid:

- Miks siiani pole selliseid teekatteid laiemalt kasutusele võetud?
- Betoontee vastupidavus kloriididele ja naastrehvidele
- Betoontee müratase ja haardetegur

Vastavalt lähteülesandele tuleb valida kaks võrdluslõiku, selgitada teede olukorda välivaatluse põhjal, teha tellijale ettepanek parima lahenduse valikuks ja kooskõlastada lahendus koos konstruktsiooni ja tasuvusarvutuse meetodikaga.

Soomes on kaalutud betoonkatendi ehitamist mitmesse kohta ja viimase veerandsajandi jooksul on ehitatud kolm katselõiku: *Valtatie* (VT) 3 (E12) Nurmijärvi¹ Helsingi lähipiirkonnas, 1991 – VT 4 Kempele-Kiviniemi Oulus ning 1994 – VT 9 Lakalaiva-Alasjärvi Tampere möödasõidul. 2006.aastal lõpetati betoonteede katselõikude seire, kuna betoonkatendid kas asendati asfaltkatenditega või kaeti asfaldist kulumiskihiga põhjusel, et betoonkatendi kulumiskindlus ei olnud vastavuses oluliselt kõrgema ehitusmaksumusega.

Rootsis on alates 1972.aastast ehitatud alljärgnevad betoonkatendiga maanteelõigud:

- | | | |
|---------------------------------|------|------------------------------------|
| • E6 Malmö-Vellinge | 1972 | 13 km |
| • E4 Helsingborg | 1978 | 7 km |
| • E4.65 Arlanda | 1990 | 1.6 km (erinevatel allikatel 4 km) |
| • E6/E20 Falkenberg 1 | 1993 | 15 km |
| • E6/E20 Falkenberg 2 (Fastarp) | 1996 | 13 km |
| • E20 Eskilstuna | 1999 | 14 km |
| • E4 Uppsala | 2006 | 23 km |

¹ <http://teilla.blogspot.com/2012/08/betonia.html>

2.1. Kempele, Soome

1991.a ehitati Valtatie 4 (E8/E75) Kempele-Kiviniemi teelõik Oulu piirkonnas (Joonis 1). Sajandivahetusel rekonstrueeriti tee tervikuna kiirteeks (esialgne konstruktsioon oli ehitatud kahe rajalisena). Betoonteena ei ole lõik säilinud.

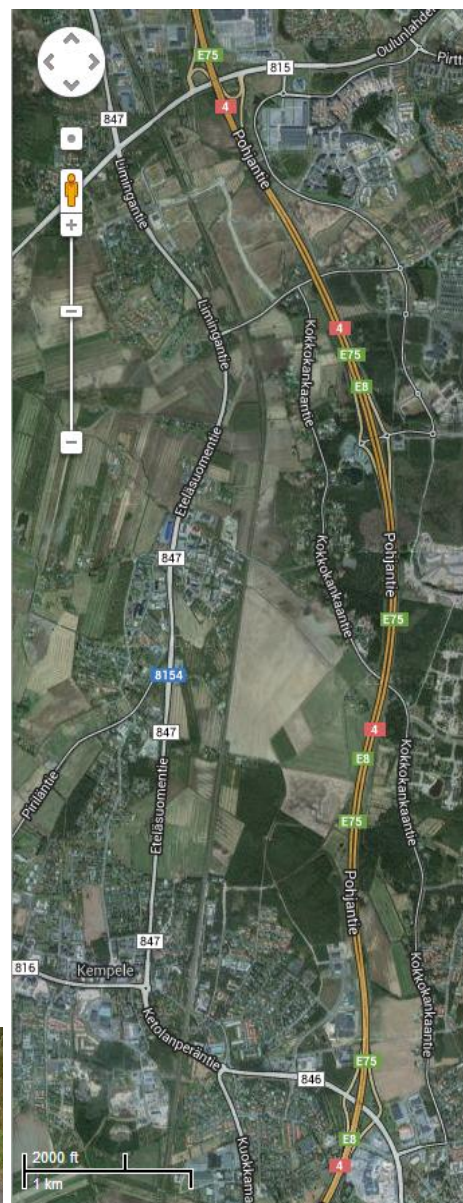
F-klassi aluspinnasel projekteeriti 190 cm konstruktsioon ja E-klassi aluspinnasel 142 cm [7]. Betoonplaadi paksus oli 22 cm, maabetonist (*lean concrete*, lahja betoon) alus 12 cm, jagav kiht killustikust 20 cm ja külmakaitsekihi paksus oli 136..120 cm (Oulu piirkonnas on arvestuslik külmumissügavus 190 cm). Betoonkatete külmumissügavuse arvestusel lähtuti asfaltkatetele esitatud nõuetest. Prognoosi järgi eeldati liikluse kasvu 1990.a 12500 AKÖL tasemelt 18650 AKÖL tasemele 2030.aastal. Projekti järgi on betoonplaadi vajalik kandevõime 184 MN/m². Betoon pidi olema survetugevusega 55 MN/m² ja paindetugevusega 7 MN/m². Betoonplaadi mõõdud on 5,0x4,75 m. Plaadi minimaalne paksus tugevusarvutuste järgi on 185 mm, millele lisandub eeldatav kulumine 3,5 cm 30 aastaga. Eeldati ekspluatatsiooni ajal sõiduraja nihutamist 0,5 m võrra kiirtee režiimi rakendamisel.

Ehituse alguses (1991) tõsteti betooni tugevusnõuded 55 MN/m² tasemelt 70 MN/m² tasemele [8]. 1997.aastal viidi läbi viimane seisundihindamine.

Tähelepanekud: ei riskitud ehitada madalama tugevusega betoonist, kuna varasemate katselõikude vastupidavus ei vastanud eeldustele (plaadid purunesid). Samas olid varem ehitatud objektid ka suhteliselt õhukese (kuni 20 cm) betoonplaadiga. Ka antud objektil fikseeriti plaatide purunemisi (Foto 1).



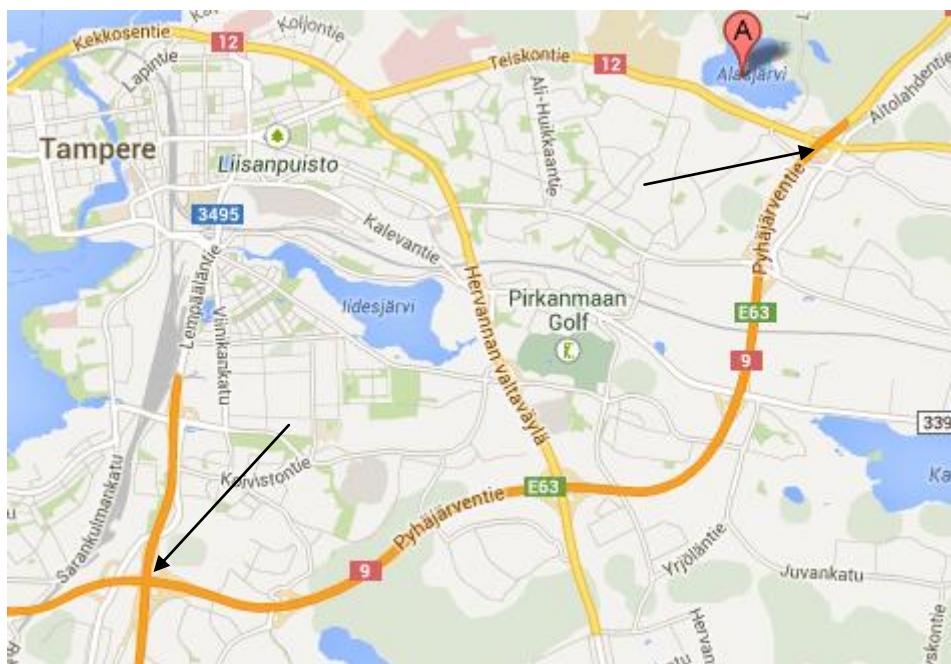
Foto 1. Vt 4 Kempele-Kiviniemi. Betoonplaatide purunemine, aprill 2009



Joonis 1. Vt 4 Kempele-Kiviniemi

2.2. Lakalaiva, Soome

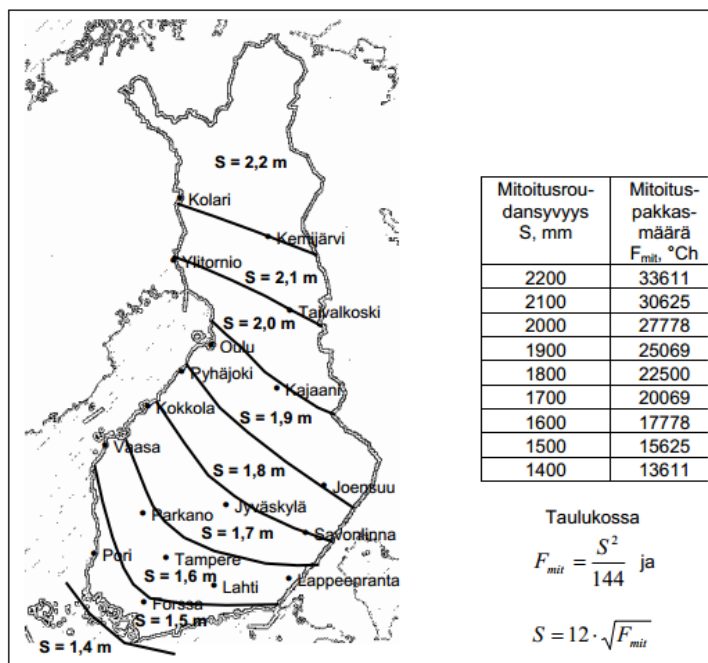
Tampere möödasõidul (Joonis 2) on säilinud ainus Soome betoontee lõik (Valtatie 9, Lakalaiva-Alasjärvi; 11,1 km), ehitatud 1994.aastal, mis 2006.aastal kaeti osaliselt asfaldiga, kuna roobaste kõrvaldamise maksumust peeti liiga kõrgeks.



Joonis 2. Vt9 Lakalaiva-Alasjärvi

Betoonkatendi pindala on kokku 250 000 m², millest 180 000 m² ehitati põhiteele ja 70 000 m² rampidele. Kasutati kõrgtugevat betooni M80 (MN/m²) paindetugevusega K7,5 (MN/m²) [5]. Be-

toonplaadi paksus mõõtmistulemuste järgi on 220-235 mm [9]. Plaat projekteeriti minimaalse arvutusliku paksusega 206 mm, millele lisati kulumisvaru. Kasutati kivimaterjali LA11, tihedus 2,96. Katendi pind ehitati pesubetonina (kõrgsurvepesuriga puhastati täiteaine ülapind betoonipiimast). Vuugitihenditena kasutati tööstuslikke tihendeid EPDM kummist.



Kuva 13. Mitoitusroudansyvyys (S) ja mitoituspakkasmäärä (F_{mit}), jota käytetään t:n takaisinlaskennassa ja vaihtoehtoisissa mitoitusmenetelmissä.

Joonis 3. Külumissügavuse tsoonid Soomes [1]

Aluskonstruktsiooni paksus (*louhelaatikko*) sõltub aluspinnase külmakindlusest. Üleminekul kalju-pinnaselt pehmele alusele projekteeriti alus 250 cm ilma drenkihihta, keskmise külmakartlikkusega savikatel moreenidel rajati drenkiht 220 cm ja vähese külmakartlikkusega aluspinnasel 180 cm sügavusele. Aluspind kuulus Soome juhendi [1] järgi E kuni F klassi (E-moodul 35..50 MPa, paisumine külmumisel 3..6%).

Vastavalt juhendile [1] on Tampere piirkonnas arvutuslik külmumissügavus 1,6 meetrit (Joonis 3), kuid keskmisest külmemal talvel, kord 10 aasta jooksul, on külmumissügavus 0,5..0,9 m suu-rem. Ilmselt seetõttu on projekteerijad valinud arvutuslikuks külmumissügavuseks 2,5 meetrit,

Projekti seirearuannetest [9] lähtub, et 10 aasta jooksul, enne asfaldiga katmist, moodustusid naastrehvide mõjul keskmiselt 13 mm sügavused roopad. 1998.aasta andmetel (4 talvega) oli roobas keskmiselt 4,4 mm sügav. Külghaardetegur oli 0,44 ja blokeeritud rattaga mõõdetud haardetegur 0,27, mis vastab 1995.a mõõtmistulemustele. Mürä mõõtmistulemused olid väga lähedased SMA-kattel mõõdetuga.

Teelõigul on varem osaliselt kasutatud roopa *remix*it (Foto 2. Vt 9 Lakalaiva) ja osaliselt täie laiusega ülekate (Foto 4). Tänapäevaks on põhitee täies ulatuses asfaldiga kaetud.



Foto 2. Vt 9 Lakalaiva, roopa *remix*, august 2011



Foto 3. Vt 9 Lakalaiva, uus ülekate, september 2013

Betooni ülakihi survetugevus tõusis nõutud 80 MN/m² tasemelt 100 MN/m² tasemele (järelkivinemine). Liikluskooormus tõusis 1994.a AKÖL tasemelt 13 500 1998.a AKÖL tasemele 21 700. Prognoosi kohaselt ennustati 2000.aasta AKÖL tasemeks 26 000.



Foto 4. Vt 9 Lakalaiva, betoonplaadi ülekate asfaltbetooniga, august 2011



Foto 5. Vt 9 Lakalaiva, betoonkate on säilinud vaid mõnel rambil, september 2013



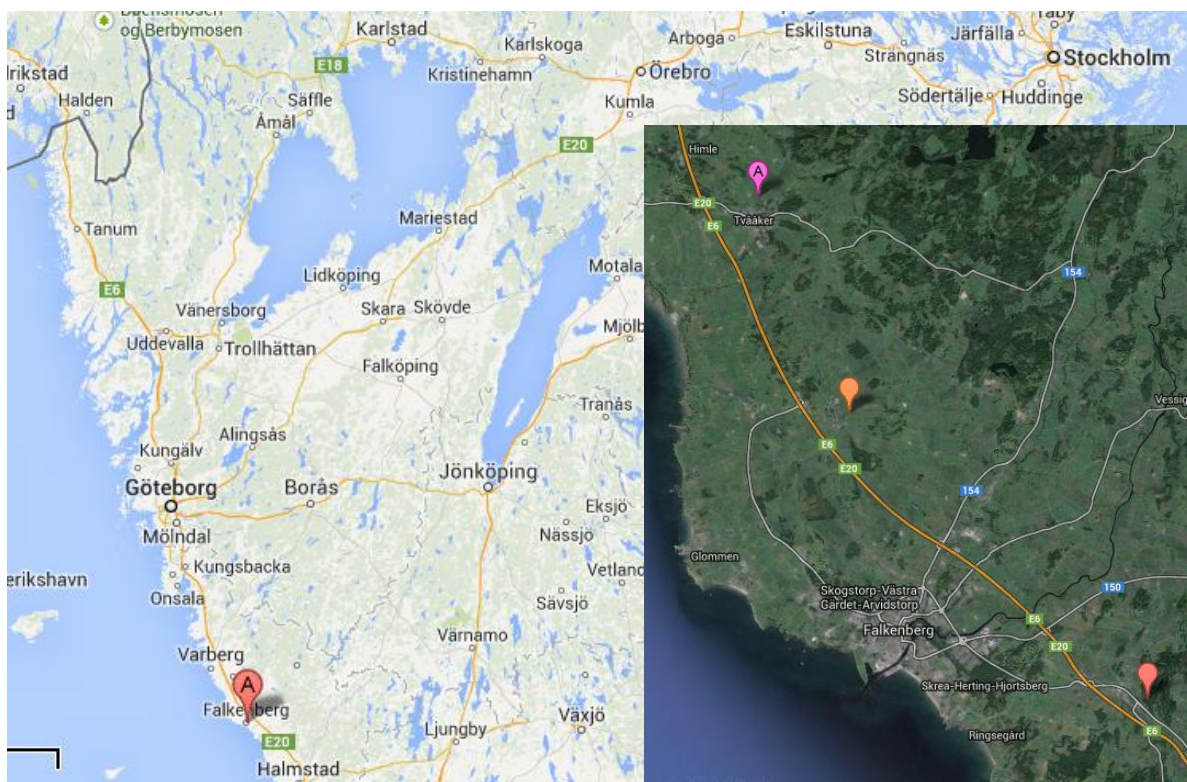
Foto 6. Vt 9 Lakalaiva, betoon on murenenud vuugi juures, september 2013

Tähelepanekud: M80 betooni teemantlihvimiseks ei olnud võimalik saada konkurentsivõimelist pakkumist, samuti puudub maailmapraktika sellise tugevusega betooni lihvimiseks.

2.3. Falkenberg, Rootsi

Falkenbergi piirkonnas (Joonis 4) ehitati betoonkatend sama tee kahel järjestikusel lõigul erinevate hangete käigus (2x250,000 m²):

- 1993 – E6 Heberg-Langas (Falkenberg)
- 1996 – E6 Fastarp-Heberg (Falkenberg)



Joonis 4. E6 Falkenberg (asukoht)



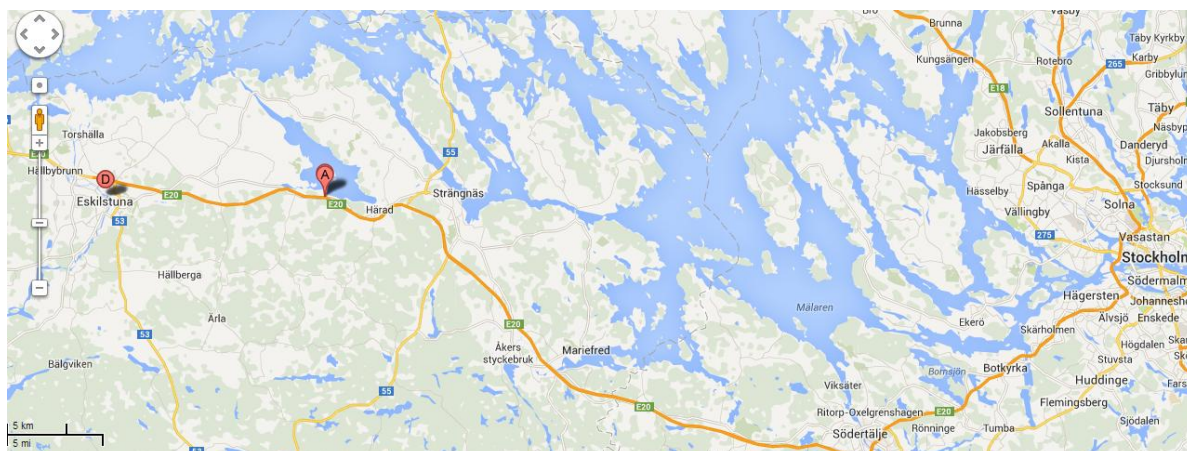
Foto 7. E6 Falkenberg, betoonkatend, august 2009²

E6 magistraalil paiknevad lõigud on Göteborgi lähikonnas ning seetõttu ei ole kliimaatilised tingimused Eestiga võrreldavad. Samuti tuleb tõdeda, et nimetatud lõikudel on naastrehvide kasutus talveperioodil minimaalne ja seetõttu moodustuvad roopad betoontee pinnal oluliselt aeglasemalt (Foto 7). Esimese lõigu ehitas konsortsium Skanska/Hochtief, teisele lõigule tarnis betooni Lohja Rudus. Projekteeritud betoonplaadi paksus oli 22 cm, kuid säästueesmärgil ehitati 20 cm plaadid [10]. Teelõigule teostatud liiklusproгноos oli adekvaatne, kuid raskesõidukite osa kasvas kavadatuga võrreldes kolmekordseks, mis muutis oluliselt tee koormusrežiimi. Muutunud on liikluse struktuur, raskesõidukitel kasutatakse *super-single* tüüpi rehve, mille tagajärjeks on suurenenud koormus katendile. Tulemuseks on tekkinud pikipraod. Ekspertide hinnangul tuleb koormuse iseloomu muutuste arvestamiseks suurendada betoonplaadi paksust ca 2 cm. 1996.aastal ehitatud teelõigul (Fastarp-Heberg) on katsetatud ka armeeritud betooni ja üks lõik ehitati pideva konstruktsiooniga vuugivabana.

Tähelepanekud: 20 cm betoonplaadi paksus osutus ebapiisavaks (tekkisid pikipraod). Koormusproгноosis alahinnati raskeliikluse struktuuri muutust ja *super-single* rehvide mõju katendile.

2.4. Eskilstuna, Rootsi

Magistraalil E20 on Stokholmist läänes (Joonis 5) 1999.a ehitatud betoonkattega teelõik Eskilstuna-Arphus (ca 9 km; 260,000 m²).



Joonis 5. E20 Eskilstuna-Arphus

² Varasematel fotodel võivad esineda geomeetrilised moonutused tulenevalt Google Streetview tehnoloogiast (põikvuugid on tegelikult reeglina tee teljega risti)



Foto 8. E20 Eskilstuna-Arphus teelõik, mai 2011

Tee peenar on rajatud asfaltbetoonist. Teel on näha kulumise jäljed (Foto 8, Foto 9).

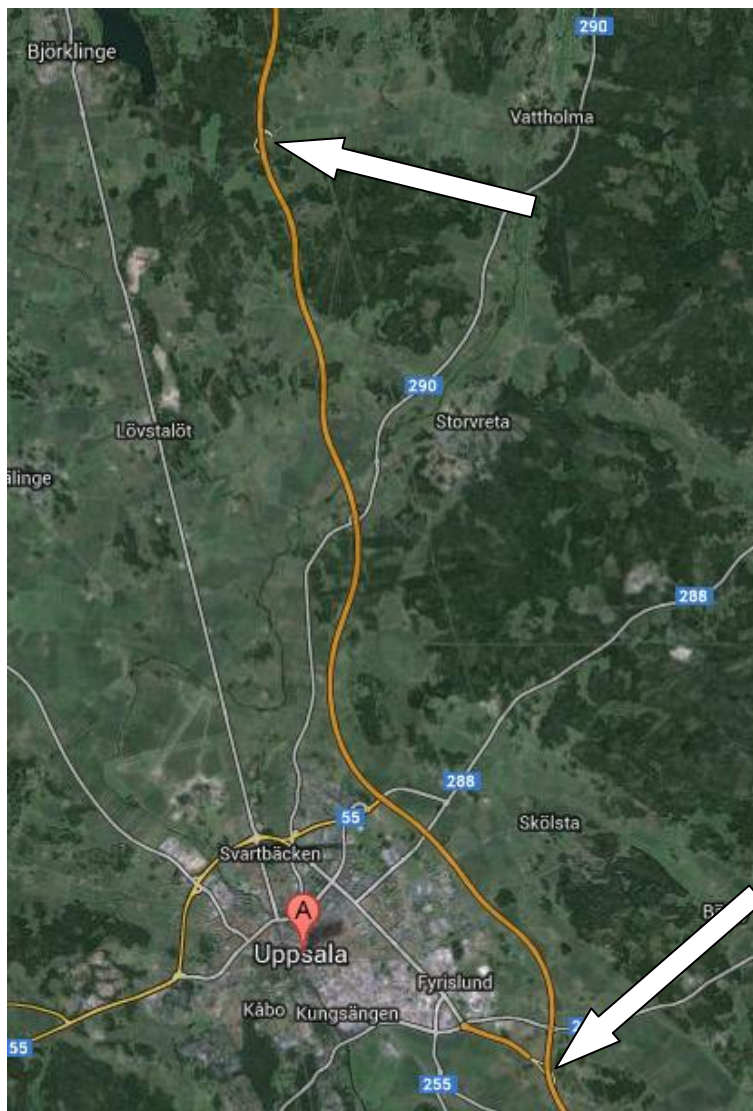


Foto 9. E20 Eskilstuna-Arphus teelõik, mai 2011

Konstruktsioon: 200 mm betoonplaat kahekihilisena, 50 mm osas 16 mm terasuurse kulumis-kindla täitematerjaliga (kuultest <6); 150 mm osas 25 mm terasuusega täitematerjaliga; ehitas CPI (Holland). Aluse tsementstabiliseeritud kruusast 150 mm ehitas Lemminkäinen OY. 2000.aasta suvel teostati katte teemantlihvimine 2-3 mm ulatuses, kuna tee haardetegur oli ebapiisav [17].

2.5. Uppsala, Rootsi

Aastal 2006 valmis Stockholmist põhjapool (Joonis 6) betoonteelõik E4 Uppsala-Mehedeby (23 km). Lõik algab Uppsala möödasõidust. Fotod septembris 2013.



Joonis 6. E4 Uppsala-Mehedeby teelõik (23 km)



Foto 10. E4 Uppsala, teelõigu algus - Stockolmist 64 km, september 2013

Katendi tüüpiline konstruktsioon:

- betoonplaat (200 mm);
- seotud alus asfaldist (100 mm) või maabetonist (150 mm);
- sidumata aluse ülakiht killustikust (80 mm);

- sidumata aluse alakiht (220 mm) purustatud kaljupinnasest või rajatud otse kaljupinnasele;
- külmakaitsekiht juhul, kui teed ei rajata vahetult kaljupinnasele.

Teel on põikvuugid 5 m vahemaaga, mis vähendavad pingeid temperatuurimuutustest. Pikivuugid paiknevad sõiduradade vahel. Paisumisvuugid rajati vaid silladeki ühendamisel ning ehituslikud vuugid katendi paigaldamisel eettulevate tehnoloogiliste pauside asukohas. Põikvuukidesse paigaldatud kummitihendid on väga hästi vastu pidanud, probleemsemaks on osutunud ehituslike vuukide täited, sest vuugi laius on suurem kui tavapärasel põikvuukidel ning vuugid täidetakse mastiksiga, mida tuleb aeg-ajalt uuendada.

E4 Uppsala teelõik (23 km) on 2+2 ristlõikega, perspektiivne liiklus 12 500 AKÖL enamkoormatud sõidurajal, millest 17% raskesõidukid (üle 3,5 tonni). Ühe raskesõiduki kohta arvestati 2,45 10-tonnist telge (varasemates projektides on arvestatud keskmiseks siirdeteguriks 1,3). Liikluse kasvuproгноos on 2,6% aastas esimese 15-20 aasta jooksul, hiljem on kasv aeglasem. Kogu läbikute arv 40 aastaga on 134 miljonit 10-tonnist telge (ESAL). Koormusarvutuste aluseks on 10-tonnine normtelg 0,8 MPa rehvisurvega.

Uppsala katendiarvutuses on eeldatud, et aluspinnase kandevõime on suvel 45 MPa ja teedelagunemise perioodil (kevad) 10 MPa. Aluspinnasele on kavandatud 850 mm purustatud kaljupinnast (E-moodul ebasoodsamal juhul 70..100 MPa), 220 mm sidumata alust (lähedane suureteralisele fraktsioneeritud graniitkillustikule, E-moodul 450 MPa) ja 80 mm tasanduskihti (lähedane 0/32 tardkivikillustikule, E-moodul 150 MPa), 100 mm asfalti (E-moodul 2500 MPa) ja 200 mm betooni (E-moodul 36000 MPa). Arvutustes on nõrgim komponent aluspinnas. Seega kogu konstruktsiooni paksuseks on 145 cm.

Katend vajab 2012.aastal remonti, põhjuseks viaduktidel paiknevatel teelõikudel plaatide pragunemine. Ilmselt on vaid sildadel eemaldatud betoonplaadi ülakiht freesimise teel ning asendatud jämedateralise asfaltbetooniga.



Foto 11. E4 Uppsala, remondilõigu üleminek, kattemärgistus, september 2013

Katendi ääremärgistuseks on kasutatud termoplasti, märgistuse kulumise tõttu on märgistus korduvalt taastatud. Täriski on dubleeritud lisaks märgistusele betoonplaadi serval ka freesimise teel peenral (ca 15*45 cm freesitud 15 cm vahega).



Foto 12. E4 Uppsala, remondilõigu üleminek sillal, september 2013

Betoonplaatide murdumist on (2013 sügisel) täheldada vähemalt 3 kohas.

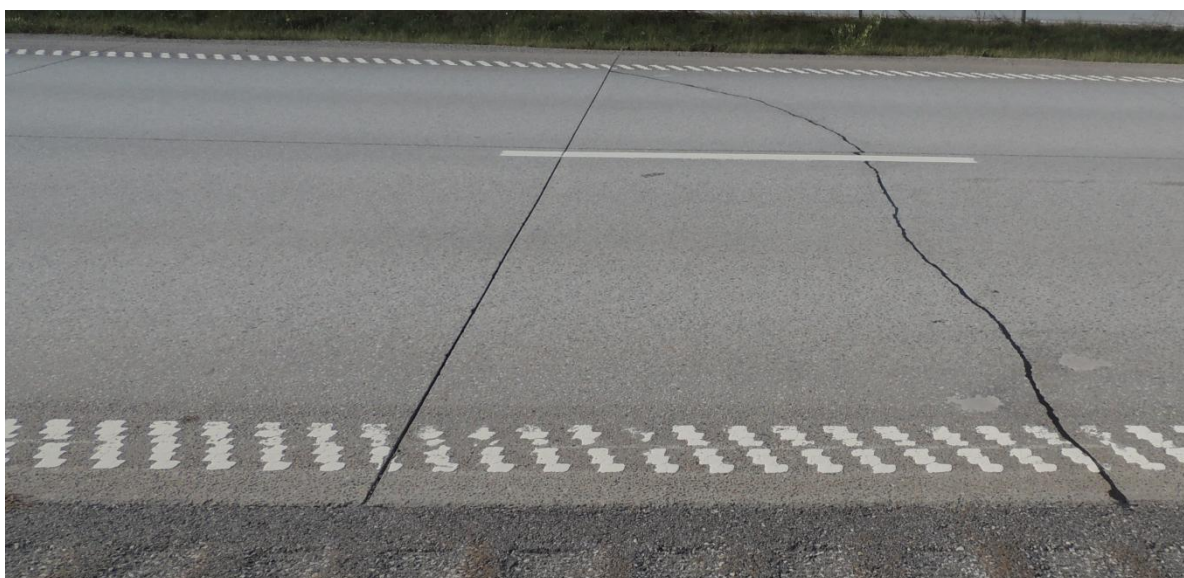


Foto 13. E4 Uppsala, betoonplaadi murdumine, september 2013

Praod on täidetud pehme mastiksiga, plaadi murdumise põhjuseks on tõenäoliselt aluse probleemid. Fotol on näha, et betoonplaadile on puuritud augud ning ilmselt on nende kaudu püütud tugevdada plaadi alust.



Foto 14. E4 Uppsala, betoonplaadi murdumine, september 2013

Betoonkatend paigaldati kahes kihis vahetult järgnevate laoturitega, vaid ülakihis kasutati väga hea kulumiskindlusega täitekiivimit.



Foto 15. E4 Uppsala, betoonplaadi murtud koht täidetud mastiksiga, september 2013



Foto 16. E4 Uppsala, vuugitihend, september 2013



Foto 17. E4 Uppsala, remondi käigus paigaldatud uus vuugitihend, september 2013

Betoonplaatide vahelises vuugis on spetsiaaltihend. Katendi remondi käigus on uuendatud ka ti-hendeid kuid vaid nende vuukide osas, mis paiknesid asfalteeritud plaatide lähedal.

Katselõigu lõpus on siiski näha, et asfaltkate on kiiremini kulunud.



Foto 18. E4 Uppsala, katselõigu lõpp, september 2013

Ca ühe kilomeetri ulatuses on lõunasuuna esimesel sõidurajal kasutatud teemantlihvimist.



Foto 19. E4 Uppsala, freesitud katend rattajäljest eemal, september 2013

Paraku on lihvitud pinnal rattajälgede kulumine naastrehvide mõjul eriti kiire.



Foto 20. E4 Uppsala, freesitud katendi kulumine rattajäljes, september 2013



Foto 21. E4 Uppsala, teelõigu lõpp (järgneb asfaltbetoonkatend), september 2013

Tähelepanek: Betoonplaadi alusena sobib kasutamiseks asfaltbetoonist aluskiht, kuna sellega on võimalik tagada betoonilaoturile vajalik kandevõime ja tasasus (lahja betooni kasutamisel oli probleeme tasasusega).

2.6. Teised näited

Rootsis on betoonteede ehitamise kogemus 1920ndatest aastatest. Varasematest teelõikudest on osaliselt säilinud vaid E6 Vellinge (1978).

- 1990 – lühike lõik E4 magistraalilt Arlanda lennujaama (4 km).



Foto 22. E4.65 Arlanda, mai 2011

Rootsi kehtivate normide järgi peab betooni tugevus üle 6000 AKÖL liiklusega teedel olema 60 või 80 MPa. 1970ndatel ehitatud teedel on kasutatud ka betooni 40 MPa, kuid selle materjaliga ei ole õhukese betoonplaadiga saavutatud konstruktsiooni piisavat tugevust, külmakindlust ja kulumiskindlust. Normides on lubatud külmakerke ulatus mitte üle 2 cm. Varasematel teedel tähelepanek roobaste moodustumise kiiruseks 0,8-1 mm/a, uuematel 0,2-0,6 mm/a. Arlandas on 10 aastaga roopa sügavuseks moodustunud 8,8 mm (Foto 22).

Norras on betoonteid ehitatud 80ndatel aastatel ning nende tehniline seisund on mitterahuldav.

Põhiliselt on betoonteed kasutatud sildade ja tunnelitega seondult. Üksikud lõigud on ehitatud ka viimase 40 aasta jooksul. Intensiivselt on betoonteedega seonduvat uuritud, kuid konkreetset teelõigud, mis on betoonkatte saanud, on kahjuks suhteliselt halvas seisus, kuna Soome ekspertide hinnangul (töökoosolek juunis 2013) on konstruktsioon liiga õhuke (alla 22 cm) ja külmakergete tõttu katend oluliselt kahjustunud. Testide tulemused [14] näitavad, et kui betoonist margiga 75..90 ehitatud kuiva katte kulumine on 7..4 mm (sõltuvalt betooni tugevusest), siis märja betooniga on kulumine 11..6 mm. 1989.aastal ehitati Norras katselõigud pindalaga 110 000 m² maanteedel E6 (plaadi paksus 18 cm) ja E18 (plaadi paksus 22 cm). Nelja aastaga tekkisid piki- ja pooleks E6 maanteel, kus tõenäoliselt on põhjuseks liialt õhukeste plaatide kasutamine. Kasutati betooni M85-M90, et saavutada vajalikku kulumiskindlust.

2.7. Kogutud tähelepanekud

2.7.1. Üldosa

Betoonkatend võib olla:

- armeerimata betoonplaatidest (Põhjamaade kogemus; plaadi pikkus kuni 5 meetrit)

- armeeritud teel valatud betoonplaatidest (Tallinn 1967; võimalik tavapärasest pikemate plaatide kasutamine)
- jätkuvarmatuuriga raudbetoonist (Austraalia kogemus; kuni 40 km vuugivaba, Arvo Tinni)
- monteeritavatest raudbetoonplaatidest (Surgut).

Armeeritud plaatide kasutamine viib ehitusmaksumuse oluliselt kõrgemaks ning komplitseerib ehitusprotsessi. Rootsis ja Soomes on kasutatud vaid armeerimata betoonkatendeid. Austraalias moodustavad armeerimata betoonkatted vähemalt 85% kogu betoonkatete pikkusest.

2.7.2. Materjalid ja konstruktsioonid

Lean concrete (maabeton, lahja betoon) – alusbeton, mille tugevus peaks olema vähemalt 4 MPa (tavaliselt siiski nõutakse 5,5 MPa). NFC ehk *no-fine-concrete*, ka *pervious concrete*, on selle erivorm, kus ei kasutata peeneteralist täitematerjali ning tulemuseks on vett juhtiv betoon. Seda kasutatakse tunnelites ja olukorras, kus pinnaseveetase võib olla kõrge ning on täiendav vajadus kapillaartõusu katkestamiseks koos samaaegse vajadusega tagada konstruktsiooni tugevus. Põhimõtteliselt on lahjas betoonis täitematerjalina võimalik ka aheraine kasutus, sest madal (olematu) külmakindlus ning kivimaterjali madal tugevus ei ole takistuseks lahja betooni nõutud survetugevuse saavutamisel.

Kasutatakse betoonplaadi alusena, Põhjamaade kogemuse järgi võib betoonplaadi aluseks olla ka asfaltbetoon, mis tagab hõlpsamalt piisava tasasuse ja kandevõime betoonplaadi paigaldamiseks. Piisava kogemuse korral on lahja betooni kasutamine odavam asfaltbetooni kasutamisest aluses.

Betoonplaadi ja aluse eristamine – kasutatakse spetsiaalset bituumenisegu või peeneteralist asfalti (kuni 30 mm), mis peab võimaldama betoonplaadi nihkumist alusel ja vähendab riski pragude tekkeks betoonplaadil väljaspool vuugitsooni.

Asfaldist kulumiskihi eelised - Minnesota ülikooli uuringute (prof. Lev Kazanovich) järgi on betoonkatte pragunemise üheks põhjuseks temperatuurigradient (Rootsi andmetel kuni 40 kraadi meetri kohta), mida on võimalik oluliselt kahandada just asfaltbetoonist kulumiskihi lisamisega. Kui aga asfaltbetoonist kulumiskihi paigaldamine kavandada vahetult uuele katele, võidame sellega kulumisvaru, mis tuleks betoonplaadi projekteerimisel lisada katteplaadi paksusele juba ehitusfaasis. Sellise konstruktsiooni korral paikneb betoonist kattekiht AC base aluskihi ja SMA kulumiskihi vahel. Tehnoloogiliselt tuleb kaaluda betoonkihi peale õhukese kaitsekihi paigaldamist näiteks kummibituumeniga valmistatud liivasfaldist, mis kaitseb betooni SMA kihti võimalikult läbiva vee mõju eest [6].

Betooni mark – margi määrab nii tsemendi liik kui ka tsemendi kogus. Tsemendi kogusest tuleb eraldub soojusenergia betooni kivistumisel. Kõrgtugeva betooni kivistumisel on see energia suurem, mis toob kaasa suurema mahukahanemise ja pragude tekke riski betooni kivistumisel. Samas on tugevam betoon ka külmakindlam, sest betoonis on vähem poore, mis võivad niiskust sisaldada.

Nii Soomes kui ka Rootsis on alates 1992. aastast rajatud betoonteelõikudel kasutatud väga tugevat betooni (M60..M100) ja betooni ülakihi parima kulumiskindlusega kivimaterjale. Lääne-Euroopas on reeglina miinimumnõudena näidatud M30..M45, kuid piiratud on ka naatriumi- ja kaaliumisisaldust (taandatud Na_2O -le alla 1%) tsemendis (piirangu vajadus sõltub kasutatava kivimaterjali omadustest), et betooni komponentide vahel ei toimuks mittesoovitavaid keemilisi reaktsioone.

Põhjamaade kogemusel on betoonkatendid ehitatud kõrgtugevast betoonist, mille tulemusena on küll saavutatud külmakindlus ja suurendatud kulumiskindlust, kuid samas ei ole osutunud võimalikuks tagada betoontee ettenähtud ekspluatatsiooniaega ilma asfaltbetoonist kulumiskihti rajamata.

Betooni järelkivinemise kiiruseks on hinnanguliselt 10-15 MPa 20 aastaga.

Plaadi paksus – Saksa normides oli varasemalt betoonplaadi paksuseks 20-24 cm, kuid praegu kehtivas normis kasutatakse vahemikku 24-27 cm. Austraalias loetakse minimaalseks armeerimata betoonplaadi paksuseks 25 cm. USAs loetakse tavapäraseks üle 19 cm betoonplaadi paksust, kuid arvestada tuleb, et nii USAs kui ka Austraalias on maksimaalselt lubatav teljekoormus 8,2 tonni. Õhukese plaadi puhul ei taga plaadi mass ka plaadi stabiilsust, esineb "pumpamise" efekt (koormus plaadi ääre all on suurem kui plaadi keskel ja tekivad aluse vajumid).

Kõik Põhjamaade katselõigud on rajatud oluliselt õhema betoonplaadiga (18-22 cm). Puuduvad katselõigud, kus betoonplaat oleks tavapärasest betoonist M45, kuid paksusega vähemalt 250 mm.

Komposiitkatenditena käsitletakse kahekihilist betoonkatendit (plaati), mille alakiht on odavamast betoonist (väiksem tsemendisaldus, nõrgem kivimaterjal) ja ülakiht kas kvaliteetsest ja kulumiskindlamast betoonist (märg märjal tehnoloogia) või asfaltbetoonist. Siinjuures on siiski arvestatud nende asfaltkatetega, mis on paigaldatud vahetult uuele betoonile asfaldikihi paksusega 5..8 cm, mitte juhuseid, kus asfaldiga on kaetud varasem betoonkatend. Hübriidsüsteeme ei ole seni modelleeritud. Alumises betoonikihis on kasutatud taaskasutatud materjale (purustatud betoon, purustatud asfaltbetoon) ning madalamakvaliteedilisi kivimaterjale. Kahe erineva betooni kasutamine nõuab kaht betooni tootmisliini ja korraga kahe betoonilaotaja kasutamist sünkroonrežiimis. Tähelepanu tuleb seejuures juhtida asjaolule, et betoonplaadi üla- ja alakihis erinevate materjalide kasutamisel on tegemist erineva soojuspaisumise teguriga (erisus võib olla kahekordne, kui kasutada alakihis paekivikillustikku ja ülakihis tardkivikillustikku). See võib kaasa tuua probleeme ja põhjustada omakorda plaadi kõverdumist või pragude teket. Erineva kivimaterjali kasutamine plaadi erinevates kihtides vajab seega täpsemat analüüsi. Eesti tingimustes pakub huvi võimalus aheraine kasutamiseks betoontee ehituses.

Külmakindlus ja külmakerked

Betooni külmakindluse ja aluskonstruktsiooni (või aluspinnase) külmakergete suhtes on võrdlusmaterjali vähe, sest Rootsi betoonteedest on vaid Uppsala lähedal E4 Eestiga analoogilises kliimavööndis (E6 Göteborgi lähedal paikneb kliimaaliselt soojemas vööndis) ning Soome betoonteedest on näitena võimalik kasutada vaid Tampere ümbersõidu teelõiku (Lakalaiva).

Betoonplaatide pragunemise vastu on kasutatud tugevamat betooni. Külmakergete vältimine on võimalik, kui kogu külmumistsooni ulatuses asendatakse materjal külmakindlaga. Seni ei ole Soomes peetud vajalikuks betoonkatenditele täiendavate nõuete kehtestamist. Homogeense aluspinnase puhul on lubatud külmakerke ulatus võrdne asfaltkatenditele kehtestatud piirväärtusega, ebaühtlase aluspinnase puhul külmakerget ei lubata.

Soome varasemate betoontee katselõikude puhul on hinnatud ebaõnnestumise põhjusena õhukest plaati, külmakerkeid ja nõrka betooni. Paraku ei ole nende tegurite mõju eristatud (ei ole teada, kas paksema plaadi või külmakindlama muldkehaga on võimalik saada kvaliteetsemat tulemust) ning on jätkatud mõõduka plaadipaksuse ja tugevama betooniga.

2.7.3. Ehituse eripärad

Betoonkatte kandevõime

Betoonkate hakkab kandma alates 4 MPa, kuid ehituse aegne liiklus lubatakse betoonile USA-s alates 10 MPa ja Austraalias 20 MPa tasemest (tee võib liiklusele avada alates 30 MPa tugevusest ka juhul, kui projektne tugevus on 35 MPa). Soomes ja Rootsis vastavad nõuded konsultandi andmetel puuduvad.

Temperatuurierisustest tulenevad pinged ja betoonplaadi pikkus

Katendi ülaosa ja alaosa on erinevas temperatuuriolukorras ning siit tulenevalt võib plaat kõverduda. See parameeter on oluline plaadi paksuse määramisel, plaadi mass takistab plaadi kõverdumist. Positiivse temperatuurigradiendi ulatuseks on mõõdetud kuni 40 C/m (õhtul) ja negatiivsel kuni 25 C/m (varahommikul). Siiski on Soome ekspertide hinnangul plaatide kõverdumise teema mõju ülehinnatud (teostatud kontrollmõõtmised ei ole kinnitanud plaatide kõverdumist)

ning seda enam, vähendab USA uuringute alusel plaatide kõverdumise riski asfaltbetooniga ülekate. Austraalias on arvestatud betoonplaadi pikkuseks maksimaalselt 4,2 m lähtuvalt kõverdumise juures moodustuvast praost plaadi otsas. Põhjamaades on kasutatud 5 m pikkuseid betoonplaate, Saksamaal on plaadi pikkus 4,5 või 5 meetrit.

Ülekoormus

Rootsi ekspertide andmetel kasutatakse Hollandis betoonkatendi dimensioneerimisel arvutuskoormusena ka ülekoormatud telge – 20..22 tonni. Kuna ülekoormus esineb ka Rootsi teedel, soovitatakse projekteerimisel seda arvestada. Väsimuskoormuse arvutamisel juhindutakse Mineri reegli juures 4-ndast astmest (tegelik teljekoormus / normatiivne 10 kN astmes 4..4,8). Tsemendiga seotud kattekihtides on ülekoormuse mõju suurem – astendajaks 12. Seetõttu peetakse vajalikuks kontrollarvutust ühekordsele ülekoormusele.

Ääre-efekt

Katendi serv peab olema vähemalt 1 meetri kaugusel rattajälje äärest – seega 0,5 m rattajäljest ääremärgiseni ja sealt 0,5 m katte servani. Põhjuseks on peenra kaudu katendisse tungiv niiskus, mis vähendab katte aluse kandevõimet, kui sõidujälg jääb katte servale lähemale, võivad koormusest tulenevad pinged serva murendada ka juhul, kui sõiduk ei satu serva alale. 4,5 meetrise plaadi laiuse puhul on seda nõuet lihtne tagada.

Betoonkatte taastamine kaeviste asukohas

Reeglina soovitatakse betoonkatet läbivaid kaeviseid mitte rajada, kasutades horisontaalpuurimist. Kui siiski on vajalik kaevise rajamine, tuleb peale adekvaatse tihendamise betoonkattesesse puurida horisontaalsed augud ja paigaldada vardad, mis peaksid parandama ühendust katte lapi ja vana kattekihi vahel.

2.7.4. Ekspluatatsiooniomadused

Haardetegur betoonil

Kuigi betooni haardetegur on madalam, ei põhjusta see oluliselt suuremat ohutaset põhjusel, et betoon säilitab paremini oma kuju (katte pinna deformatsioone on vähem) ning vesiliu oht väiksem, sest roopad moodustuvad aeglasemalt.

Veeretakistus on betooniteel väiksem põhjusel, et koormatud sõiduki ratta poolt põhjustatud katendi deformatsioon on oluliselt väiksem. Arvutustes on seda võimalik arvesse võtta, kütusekulu on VTI (Rootsi) andmetel ca 1,1% väiksem.

Müra betoonil

Möötmistulemuste järgi on müratasemed betoonil ja asfaldil lähedased, kuid müra spekter on erinev. Asfaltkatte müra spekter omab tippu 800 Hz sagedusel, betoonkattel 1200 Hz sagedusel (eeldusel, et vesi ja õhk rehvi alt juhitakse nii rehvimustri kui ka katte pinna karestamise protsessis kõrvale), mis on inimkõrvale oluliselt häirivam (vilistab). Seetõttu on asutud betoonkatteid karestama piki teed (*nextgen concrete surfacing*, 3 mm sügavused sooned koos katte ülapinna karestamisega), mis on langetanud müra tipu sagedust 900 Hz-le ning mõnevõrra kahandanud mürataset.

Valgustatus

Erineva peegeldustaseme tõttu on erinevate riikide andmetel betooniteel vajalik kuni 33% väiksem lisavalgustatus. Tavaliselt on see saavutatud valgustite vahemaa muutmisega, kuid põhimõtteliselt on võimalik ka reguleerida valgustugevust muutmata vahemaad. Soome ekspertide hinnangul on võimalik sääst 10% ulatuses. Käesolevas soovitame piirduda reguleerimisega, kuna sel juhul võimaliku asfaldiga ülekate puhul pole vaja valgustussüsteemi ümber ehitada.

Teemantlihvimine (*diamond grinding*)

Teekatendi kareduse taastamine kõrgtugevast materjalist lõikeseadme abil. USA andmetel on lihvitud katendi tööaeg keskmiselt 16-17 aastat. Kalifornias lihvatakse ca 2000 jooksvat miili katendit igal aastal. Lihvimise ulatus on 3-20 mm, lihvamise tempo kuni 600 m päevas ning lihvida saab ka uusi katendeid (vähemalt 7 päeva vanuselt). Reeglina lihvatakse USAs katendi karestamiseks, raske on leida juhtumeid, kus teemantlihvamise teel on taastatud naastrehvide poolt kahjustatud betoonkatendeid.

Põhjamaade betoonteede katselõikudel on kasutatud kõrgtugevat betooni, mille lihvimiseks ei ole leitud sobivat tehnoloogiat ja ettevõtjat.

Katendi markeerimine

Betoonkatendi markeerimiseks tuleb kasutada värvimist, mis tõenäoliselt vajab uut värvikihti üle aasta (markeeringu tööaeg kaks aastat). Termoplastmarkeering nakkub halvasti betoonkattega, sest asfaltkatte puhul osaleb nakkas aktiivselt ka sideaine, betoonil mitte. Et pikendada katendi ekspluatatsiooniga enne nõutavat lihvimist, tuleb iga järgmise markeeringuga nihutada sõiduraja asukohta betoonplaadil võimaluse piires 50 cm võrra. Samas peab eelnevalt analüüsima, kas sellisel tegevusel võib olla liiklusohutuse suhtes negatiivseid tagajärgi (vana markeering tuleb eemaldada, uue markeeringu kandmise hetkeks ei tohi roopasügavus ületada teatud piirväärtust).

Talihooldekulud

Soome kogemuste järgi ei ole otstarbekas käsitleda tasuvusarvutustes talihooldekulude erisusi, sest kui esimeste külmade perioodiks on betoonkattes suveperioodil salvestunud soojusenergia ja seetõttu tekib esimene libedus hiljem, siis kompenseerub see kevadperioodil, kui asfaltkate sulab kiiremini ja betoonkatend võib vajada jäätõrjet ka siis, kui asfalt seda enam ei vaja. Asfalt- ja betoonkattel puuduvad märkimisväärsed erisused, mis mõjutaksid talihooldust.

Haardetegur

Pinnakareduse säilimine on betoonkatendi puhul probleemne, kuid kasutades asfaltkattega analoogset kivimaterjali betoonkatendi ülakihi ning pesubetooni tehnoloogilist lahendust (betooni valamise järgselt puhastatakse betooni ülakiht harjamise ja survepesu teel liigsest sideainest), saavutatakse katendi valmimisel asfaltkatendiga analoogne haardetegur. Edasises dunaamilises protsessis tingimustes, kus naastrehvide kasutus on talveperioodil intensiivne, kompenseerib talvine naastrehvide mõju suverehvide mõjul langenud haardeteguri (suvega lihvatakse katend libedamaks, talverehvid karestavad katendi). Riikides, kus naastrehvide kasutus on keelatud või naastrehvidega on varustatud väga väike osa sõidukitest, on betoonkatendit vaja regulaarselt karestada (Austraalia kogemuse järgi 40-aastase eluea jooksul vaid korra, eemaldades kattest 8 mm kihi). Selleks kasutatakse valdavalt teemantlihvimist, kuid erinevalt roobaste tasandamiseks vajalikust lihvimisest (lihvimissügavus veidi suurem moodustunud roopa sügavusest), piisab karestamisel oluliselt väiksemast lihvimissügavusest. Haardeteguri erisustest tuleneva liiklusõnnetuste riski arvestamine on probleemsem, sest Põhjamaades on betoonteede osakaal niivõrd väike, et õnnetuste statistikas on raske eristada tõenäolise põhjusena haardeteguri erisusega seotud õnnetusi – Soome objektide puhul on täheldatud vastupidist – et betoonteest ja selle võimalikust madalamast haardetegurist on juhte hoiatatud vastavate liiklusmärkidega, on juhid olnud ettevaatlikumad ning betoonkatendiga teelõikudel ei ole toimunud rohkem liiklusõnnetusi, kui samaväärse liikluskoormusega asfaltbetoonkatenditel.

2.7.5. Naastrehvide mõju katendi kulumisele. Deformatsioon

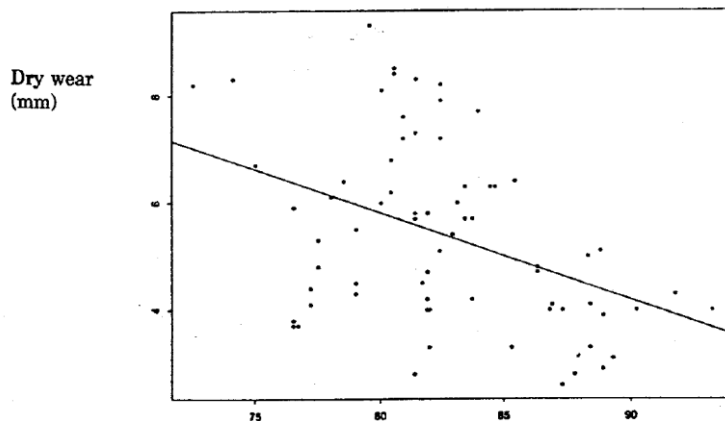
Samaväärse kivimaterjali korral on betoonkatte kulumiskindlus ca 3 korda suurem asfaltkatte kulumiskindlusest. Kulumiskiirus ei ole ühtlane, Soome andmetel on asfaltbetoonkatendi kulumiskiirus roopa moodustumisel suurem katte ekspluatatsiooniperioodi alguses. AC20 asfaldil on kulumine roopasügavuse vahemikus 8-12 mm (ca poole maksimaalse terasuuruse tasemel, sest siis on rehvide paljastatud kivimaterjali pind maksimaalne) aeglane ning suureneb uuesti sügavama roopa korral. Kuuma suvega kasvab deformatsiooni ulatus (eristame selle kulumisest). Roopasü-

gavust mõjutab ka raskesõidukite peatumine teel (staatiline koormus). Raskeliikluse osakaalus üle 10% prevaleerib deformatsioon, alla selle piiri naastrehvidest tulenev kulumine. Deformatsioonijäljes on selgelt eristatavad raskeliikluse vajum (jälgede vahe 180-190 cm) ja naastrehvide kulumine (jäljevahe 140-150 cm). Rehvi madalam profiil kahandab kulumist (10% madalam – 10% vähem kulumist) ning suurem rehvisurve tõstab kulumist (4,5% suurem rehvirõhk – 3,6% suurem kulumine). Samuti on otsene seos naastrehve kasutava sõiduki massi ja kulumise ulatuse vahel (8% suurem mass – 11% suurem kulumine). Helsingi uuring [27] näitab, et naastrehvide kasutus kiirusel 50 km/h liiklussagedusel 20 000 AKÖL eemaldab kattest 300 kg asfaldi jooksva kilomeetril aastas.

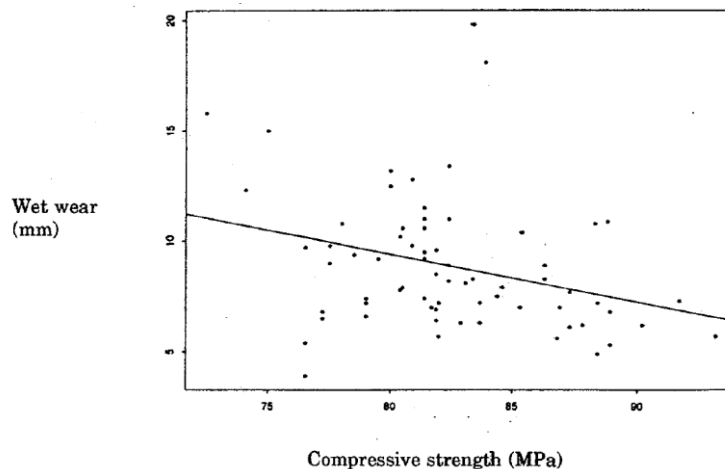
Maano Koppel [15] on eeldanud, et asfaltkate tuleb uuendada, kui roobas ulatub 20 mm-ni ning see vastab kulumise ulatusele 192 tonni asfaldi kilomeetrile. Helsingi uurimistulemused [27] linnaliikluses on uuemad ja võtavad paremini arvesse nii liikluskooresseisu kui ka rehvitüübi arenguid, kuid maanteekiirustel on kulumine 2 korda kiirem. Rootsi varasemad uuringud on hinnanud kulumise ulatuseks 46 tonni miljoni autokilomeetri kohta, millest tulenevalt tuleks kate uuendada ca 3 miljoni autokilomeetri järel.

Betoonkatte tegelik kulumine oli 13 mm 10 aastaga (Lakalaiva, Soome), kusjuures keskmiseks liikluskooormuseks võime arvestada 20,000 AKÖL (0,65 mm aastas 10,000 AKÖL kohta).

Norra stendikatsed [14] erineva betooni tugevuse juures³ näitavad kulumist kuival (Joonis 2) ja märjal (Joonis 8) katendil alljärgnevalt:



Joonis 7. Betoonkatendi kulumiskiirus naastrehvide kasutusel kuival katendil



Joonis 8. Betoonkatendi kulumiskiirus naastrehvide kasutusel märjal katendil

³ <http://www.icpi.org/sites/default/files/techpapers/494.pdf>

Norras on naastrehvide kasutamine lubatud 1.novembrist lihavõttepühade järgse nädala lõpuni. Trondheimi ja Oslo kesklinnades on naastrehvide kasutus lubatud vaid eritasu (30 NOK) eest.

2.8. Kokkuvõte senistest kogemustest

- 1) Põhjamaade katselõigud on ehitatud kõrgtugevast betoonist ja neid ei ole lihvitud (teadaolevad lühikesed lõigud on lihvitud haardeteguri tõstmise eesmärgil järelkivinemata katel). Kui roopasügavus ületab lubatud piirväärtust, kaetakse tee või sõidurada asfaltbetooniga.
- 2) Kõrgtugeva betooni (M60..M100) korral on 18 cm plaadipaksus osutunud liiga õhukeseks, 22 cm plaadid on seni vastu pidanud. Austraalia kogemuse järgi on tavapärase tugevusega betooni (M35..M45) puhul minimaalselt lubatav plaadi paksus 25 cm, Saksa normides sätestatakse plaadi paksus vahemikus 24-27 cm.
- 3) Betoonplaadi all peab olema piisava kandevõimega tasane pind, valides maabetooni (*Lean Concrete*; *Roller-Compacted-Concrete*) ja kandevkihi asfaltbetooni (*AC base*) vahel tuleb eelistada asfalti, sest sellega on võimalik saavutada parem tasasus.
- 4) Põhjamaade katselõikude kogemuste järgi tuleb betoonkatte rajamisel kasutada eelnevate kogemustega ehitusbrigaadi.
- 5) Põik- ja pikivuugid lõigatakse tardunud, kuid mitte kivistunud katendisse. Vuugitihendina kasutatakse EPMD kummist spetsiaalprofiile, mastiksiga täitmist kasutatakse ainult läbivates ehituslikes (vahetuste vahe, ühendus sildade-viaduktide betoonplaadiga) vuukides. Spetsiaalprofiilid on vajanud vaid ülevaatus ja hooldustööde käigus on vaja asendada vaid ehituslike vuukide mastiks.
- 6) Teekatend tuleb markeerida viisil, et sõidujälg ei ulatuks plaadi välisserva äärmisele meetrile.
- 7) Betoonplaadi paigaldamisel tuleb väga täpselt kontrollida paigaldatava betooni konsistentsi ning välistada risk, et vibraatoriga betooni tihendades vajuks tugevateraline kivimaterjal betooni sügavamatesse kihtidesse. Praktikas nõuab see äärmiselt stabiilset töökiirust (1 m/min).
- 8) Kui probleemseks osutub nõutava betoonikoguse pidev tarne, on võimalik kavandada betoonkatend vaid esimese sõiduraja ulatuses.
- 9) Vahetult paigaldamise järel tuleb betooni ülakiht puhastada liigsest mördist ja avada kulumiskihi kivimaterjal (pesubetoon).

3. EESTI OLUDESSE SOBIVAD BETOONKATENDI TÜÜBID

Vastavalt lähteülesandele tuleb dimensioneerida kolm konstruktsiooni:

- *betoonkattega 2+2 tee, arvestades Eesti külmumissügavustega;*
- *betoonkatend asfaldist kulumiskihiga;*
- *asfaltkatend lubatava külmakerke suurusega 4 cm.*

Aluseks võtta tolme liivsavi 2 niiskuspakkonnas ja 5 erinevat liikluskoormust

Arvutada teetööde ühikhindade põhjal ruutmeetri ja kilomeetri ehitus- ja hooldusmaksumused 2012.a hindades. Tegevuste mahud võtta analoogilistelt objektidelt, Norra-Rootsi-Soome tasuvusarvutustes kasutatud hindade ja sagedustega. Arvestada ka tsükliliste taastusremondi tegevustega (diamond grinding).

3.1. Võrreldavad konstruktsioonid

3.1.1. Betoonkatend ilma asfaltbetoonist kulumiskihita (tüüp BET).

Betoonplaadi projekteerimisel tuleb eeldada, et aluspinnas ei ole homogeenne. Homogeense aluspinnase puhul on võimalik lubada külmakerget vastavuses projekteerimismõõnidega, ebaühtlase aluspinnase puhul tuleb asendada pinnas kogu külmumistsooni ulatuses.

Maksumusest lähtuvalt on valitud armeerimata teel pidevas protsessis valatud lõigatud vuukidega betoonplaatidega konstruktsioon (armeeritud plaatidega konstruktsioon on ca 1,5 korda kallim – A.Tinni).

Katendi materjali valikul on arvestatud teemantlihvimise võimalusega ja seetõttu on kavandatud kasutada M45 betooni. Plaadi paksuse määramisel on juhitud nii Saksa normidest (plaadi paksus 23-27 cm) kui ka Austraalia kogemusest (armeerimata betoonplaadi paksus vähemalt 25 cm).

Projekteeritud betoonplaadi paksuseks on 25 cm. Katteplaat valatakse kahekihilisena märjal meetodil (kaks laotajat vahetult teineteise järel), plaadi ülakiht 8 cm tugevast killustikust ja tugevamargilisest betoonist (betoon sisaldab 0/1 liiva ja 4/8 killustikku ning paigaldamise järel harjatakse ülakihist 8 mm ulatuses välja betoonimört), alakiht 14 või enam (kivimaterjalina võib kasutada jämedateralist paekillustikku või kruusa).

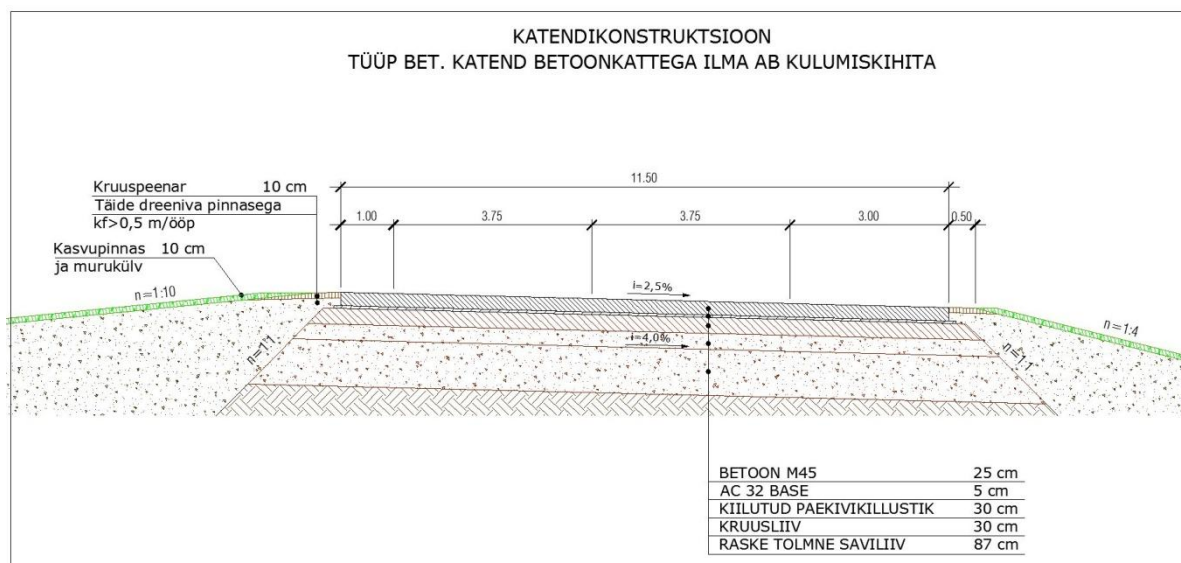
Aluseks on kavandatud 5 cm poorset asfaltbetooni (AC base) killustikalusel. Nii asfaltbetoonis kui ka killustikaluses on kasutatud paekivi.

Kiilutud killustikalus paksusega 30 cm ehitatakse fraktsioneeritud killustikust.

Dreenkiht (kruusliiv) 30 cm peab vastama mulde ülaosale esitatud nõuetele (filtratsioon maksimaalsel tihendusel 0,5 m/ööp).

Külmakindlate materjalide kasutamine on nõutav kuni 177 cm katte pinnast (seega 87 cm dreenukihi alapinnast). Kui geoloogilise luure andmetel on tegemist mittehomogeense muldkeha ja aluspinnasega, siis tuleb materjal samas ulatuses homogeniseerida segamise teel. Erandina on võimalik materjali mitte asendada juhul, kui piisavas laiuses (betoonkatendi laius koos 1:1 survekoonusega) on tegemist vana muldkehaga, kus ei ole täheldatud külmakerkeid.

Betoonkatendi tüüpristlõige (tüüp BET) on esitatud Joonis 9. Betoonkatendi ristprofiil (2+2 üks niit)

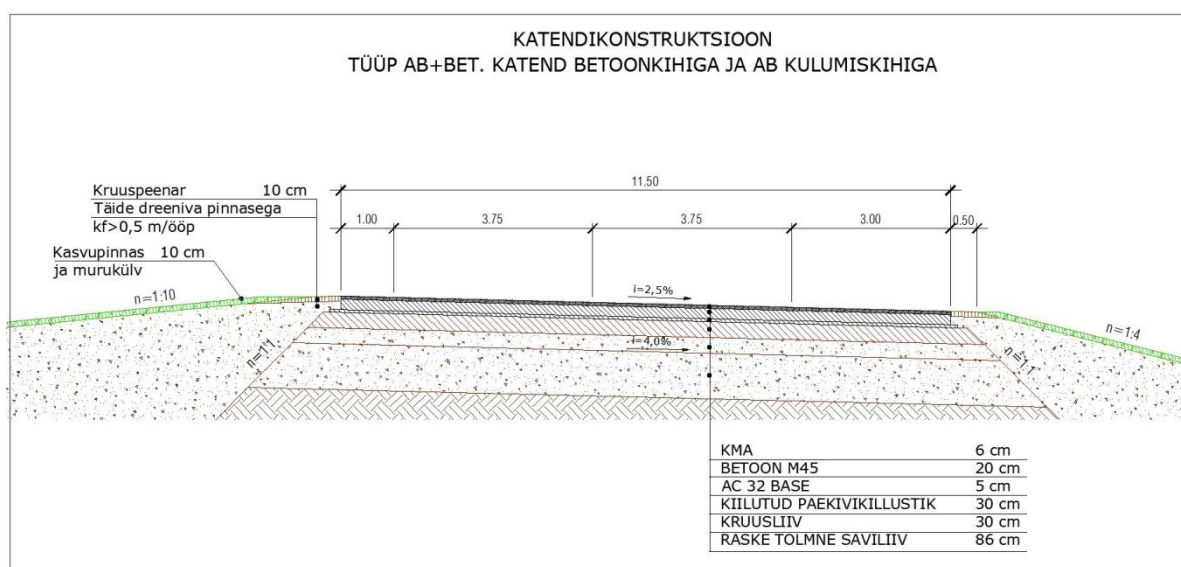


Joonis 9. Betoonkatendi ristprofiil (2+2 üks niit). Tüüp BET

3.1.2. Katend betoonkihiga ja asfaltbetoonist kulumiskihiga (tüüp AB+BET).

Asfaltbetoonist kulumiskihi kasutamisel on arvutuslik betoonplaadi paksus (Soome kogemuste alusel) 20 cm (mis on ka arvutuslikult minimaalne 5 meetri pikkuse plaadi korral). Asfaltbetoonist kulumiskihit ei lisa katendile tugevust. Arvestades praktilisi kogemusi Falkenbergi objektil (Rootsi), mis seonduvad *super-single* rehvitüübi laialdase levikuga, ei tohi kasutada õhemaid plaate. Betooni nõuded vastavad sillaehituses kasutatavatele (M45). Aluskonstruktsioon kavandatakse analoogiline eelmisega (tüüp BET).

Betoonplaadi peale paigaldatakse asfaltkate (SMA) paksusega vähemalt 5 cm. Siin on tehnoloogilised võimalused, kasutada peeneteralist hea nakkega asfaldikihti isolatsioonikihina, kuid Aust-raalia kogemusel võib SMA kihi paigaldada vahetult betoonile. Asfaltkihtide asendamine on kavandatud vastavuses roobaste moodustumisele, eeldatavalt viieaastase tsükliga, 20ndal aastal eemaldatakse kogu kulumiskihit, vajadusel remonditakse isolatsioonikiht ning rajatakse uus kulumiskihit. Tüüpristlõige AB+BET on esitatud Joonis 10.

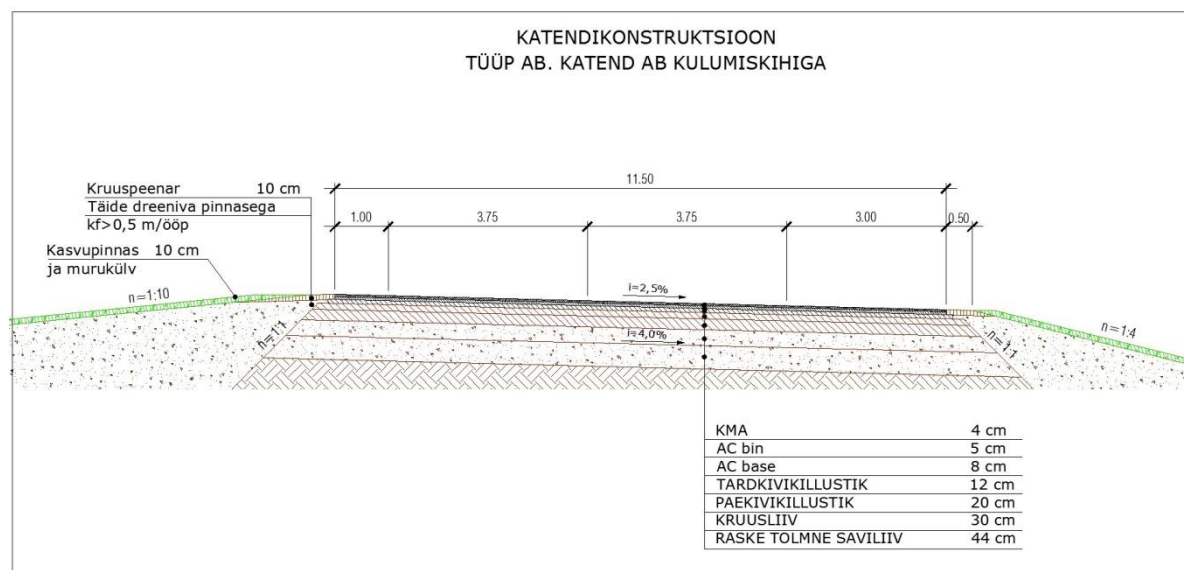


Joonis 10. Asfaltbetoonist kulumiskihiga betoonkatendi ristprofiil (2+2 üks niit). Tüüp AB+BET

3.1.3. Asfaltbetoonkatend (tüüp AB)

Asfaltbetoonkatendi dimensioneerimine on teostatud kasutades Excel rakendust KAP, mis on kohustuslik kõigi projektide teostamisel ja mille kasutamist on nõutud ka käesolevas uuringus.

Asfaltbetoonkatendi puhul arvestatakse lubatud külmakerkega vastavuses kehtivate normatiivide ja juhenditega (4 cm). Konstruktsioon on kolmekihilise asfaldiga vastavuses kehtivate projekteerimisjuhistega. Esimese 20 aasta (katendi eluiga) konstruktsioon on projekteeritud killustikalusel. Järgneva 20 aasta konstruktsioonis (remont pärast 20 aastat) säilitatakse aluskihid ning osa killustikalust asendatakse kompleksstabiliseeritud alusega ja rajatakse uus asfaltkate. Katendi kogupaksus säilitatakse eeldusel, et teelõigul on teed ületavaid viadukte, mille kõrgusgabariit vajab säilitamist (mis ei ole algselt rajatud varuga). Katendiarvutused on toodud Lisas 3. Tüüpristlõige (AB) on esitatud Joonis 11.



Joonis 11. Asfaltbetoonkatendi ristprofiil (2+2 üks niit). Tüüp AB

3.2. Liiklussagedus ja koormusintensiivsus ning prognoos.

Prognoos on vajalik asfaltkatendi dimensioneerimiseks. Tee klassi ja seeläbi ristlõike geomeetria määrab liiklussagedus. Et selgeks teha, millisest koormussagedusest alates on sobilik kaaluda betoonkatendi ehitamist, tuleb määratleda tõenäoline koormuste diapason. Kuna asfaltkatend asendatakse 20 aasta järel, on vajalik eraldi käsitleda koormusprognoosi ka ajaperioodiks +20..+40 aastat.

Arvestades täna esinevate liikluskoormustega Tallinna lähedastel peateedel ning toetudes ka Soome, Rootsi ja Austraalia kogemustele (projekteerida siis, kui koormus ületab 10 000 AKÖL, ehitada siis, kui koormus ületab 15 000 AKÖL), on analüüsiks valitud teelõigud, kus liikluskoormus ületab 10 ,000 AKÖL (2012 andmetel kokku 77,6 km). Detailsed andmed 2012.a liikluse osas on esitatud Lisas 1.

Kuna betoonteede eelis on just suuremas kandevõimes, on teine valikukriteerium raskeliikluse kogus tee ristlõikes.

Eesti põhimaanteedel on kokku 387 km, mille raskeliiklus ületab 1000 sõidukit ööpäevas. 63,4 km puhul on koormus üle 1500 ja 24 km osas üle 2000 sõiduki ööpäevas (Väo-Loo lühike lõik Narva maanteel ja km 0-19 ning 23-28 Tallinna ringteel). Edasiseks analüüsiks on valitud raskeliikluse vahemik 1000-3000 autot/ööp.

Liiklusprognoos (AKÖL) valimile Eesti põhimaanteedest on koostatud kahes variandis – vastavuses projekteerimismormidega ja baasprognoosi alusel ning esitatud tabelina (Tabel 15. Valitud

teelõigud võimalike betoonkatendite rajamiseks, liiklus- ja koormusproгноos). Koormussageduse prognoos (normtelge enamkoormatud sõidurajale) on koostatud kolmes variandis, käesolevas käsitletakse vaid projekteerimismnormide kohast prognoosi (Tabel 1) ja lisas 2 on esitatud alternatiivsed prognoosid (Rootsi, Austraalia).

Koormuse arvestusel on eeldatud keskmise raskesõiduki siirdeteguriks 2,45 (Rootsis, Uppsala teelõigul WIM-teel leitud raskesõidukite keskmine siirdetegur, mis arvestab rehvitüüpi ja rehvisurvet 0,8 MPa).

Kehtivas projekteerimismnormide redaktsioonis on küll sätestatud liiklusprognoosi reglement tee klassi määramiseks, kuid samas on antud valem 4.5, millest tuleneb iga-aastane koormuse kasv 1,5%. Need kaks tingimust on teineteisest sõltumatud, kuid siiski tuleks liiklusprognoos kohan-dada sõidukiliikide vahel vastavuses koormusprognoosiga. Tabel 1 on esitatud koormuse prognoos erineva raskeliikluse sageduse korral tänases liikluses (1000 kuni 3000 raskesõidukit kogu ristlõikes).

Tabel 1. Koormuse prognoos kehtivate projekteerimismnormide järgi

	Raskeliiklus (sõidukit ristlõikes)					Koormuse kasv	
	1000	1500	2000	2500	3000	aastane	10 aastaga
2012	1161	1741	2321	2901	3482	1,015	1,160541
2022	1347	2020	2694	3367	4041	1,015	1,160541
2042	1563	2345	3126	3908	4689	1,015	1,160541
2052	1814	2721	3628	4535	5442	1,015	1,160541
Koormuse kasv 40 aastaga							1,814018
						0,45	rajategur
	9,665	14,498	19,331	24,163	28,996	miljonit raskesõidukit rajale	
						2,45	siirdetegur
	23,680	35,520	47,360	59,200	71,040	miljonit telge rajale	

Summaarne koormus on arvestatud 40 aasta peale. Saksa normide järgi kasutatakse betoonkatendi tüüpkonstruktsioone reeglina juhul, kui summaarne koormus jääb vahemikku 3,2 kuni 100 miljonit normtelge.

Koormuse arvutus asfaltkatendi projekteerimiseks 20-aastase katendi tööea järgi tugineb eeltoodud prognoosil (projekteerimismnormide järgi). Et kehtiv katendite projekteerimisjuhend käsitleb 15nda aasta koormussagedust, siis tuleb 20 aasta koormus teisendada 15 aastale. Kumulatiivne summaarne koormus väljendub 1,5% iga-aastase kasvu korral valemiga $S=A*1,125^{15*365}$, kus A on taandatud algne koormus, selle järgi on 15nda aasta koormus leitav valemiga $B=A*1,25=S*1,25/1,125^{15/365}$ ehk $S*202,9$ kus S on miljonites normtelgedes enamkoormatud sõidurajal ning B on 15nda aasta koormuseks taandatud arvutuskoormus. Katendiarvutuste aluseks olevad taandatud koormussagedused on esitatud alljärgnevas tabelis:

Tabel 2. Asfaltbetoonkatte dimensioneerimise koormussagedus

	Arvutuslik koormussagedus enamkoormatud sõidurajal				
Esialgne	1000	1500	2000	2500	3000
Esimene katend (+20)	1764	2647	3529	4411	5293
Teine katend (+40)	2376	3565	4753	5941	7129

3.3. Katendi kulumiskiirus

Eesti katendite kulumiskiiruse kohta on kasutatud teeregistri andmeid. On teada, et 2+2 ristlõikega teedel esimese raja roopasügavuse moodustumises oluline osa on raskeveokite põhjustatud

deformatsioonis, mitte kulumises. Katendi taastamise planeerimisel ei ole vahet, kas tegemist on naastrehtidest põhjustatud kulumise või raskesõidukitest tuleneva deformatsiooniga.

Valimi võrdluses kasutame ainult killustikmastiksasfaldiga kaetud teelõike.

T4 (Tallinn-Pärnu) – suund 1 km 22,3-24,0 – ehitatud 06.2008, roobas mõõdetud 2012. a paremal rajal 8,4 mm ja vasakul 6,4 mm – kulum 2 mm aastas; suund 2 on tegemist ühe aasta andmetega, keskmine 4,3 mm.

T2 (Tallinn-Tartu) – suund 1 km 9,9-12,1 – ehitatud 08.2010, roobas mõõdetud 2012.a paremal 4,2 vasakul 3,1 mm (ca 2 mm/a) ja km 12,1-20,0 – ehitatud 06.2011, roobas mõõdetud 2012. a. paremal 8,0 mm vasakul 5,9 mm.

T1 (Tallinn-Narva) – ehitatud 2005.a (suund 1 augustis, suund 2 novembris), kuid roopa *remix*'i meetodil on katet remonditud 2011.a, seetõttu ei saa selle teelõigu andmeid analüüsi tarbeks kasutada.

Teelõikude liikluskoormus 2008-2012 on toodud alljärgnevas tabelis (AKÖL / raskeliikluse %):

Tabel 3. SMA-katendite kulumiskiirus 2+2 teelõikudel

Teelõik	T2 km 9-12	T4 km 22-24
2008	15679/8	13432/10
2009	15850/8	12812/9
2010	15725/8	12233/12
2011	15840/7	12661/14
2012	14662/8	12778/14
Keskmine	15671	12783
Roobas	3,6 (kahe aastaga)	7,4 (nelja aastaga)
kulumiskiirus 10,000 AKÖL kohta	1,2 mm/a	1,4 mm/a

Vastavalt tee seisundinõuetele on maksimaalne lubatud roopa sügavus 20 mm. Edaspidistes arvutustes on keskmiseks kulumiskiiruseks SMA katendil 1,3 mm/a 10 000 AKÖL kohta.

Betoontee kulumiskiirus Lakalaiva näitel oli 13 mm 10 aastaga 20 000 AKÖL keskmise liikluse juures. Seega oli Soome betoonkatte kulumine täpselt kaks korda aeglasem. Edaspidises tasuvusarvutuses on arvestatud betoonkatte (M45) kulumisega maksimaalselt 20 mm 10 aasta kohta.

Vastavalt tee seisundinõuetele on maksimaalne lubatud roopa sügavus 20 mm. Edaspidises tasuvusarvutuses on arvestatud asfaltkatte ja betoonkatte kulumiskiirust ning katendi remonti vastavuses eeltooduga.

Suurim ebamäärasus on betooni M45 kulumiskindluse hinnangu ebatäpsuses. Põhjamaades on kasutatud M80 ja tugevamat betooni ning pole teada, kas kulumiskindlus on lineaarses seoses betooni margiga.

4. TASUVUSARVUTUSED

4.1. Meetod ja eeldused

Tasuvusarvestuse teostamisel on arvestatud käesoleva töö lähteülesandes (tehniline kirjeldus) etteantud andmete ja püstitatud ülesannetega.

Tasuvusarvutus on teostatud diskonteeritud vähimkulude meetodil. Vastavalt lähteülesandele on tasuvusarvutuses vaadeldav periood 40 aastat ja diskontomääraks on 6%. Kokkuleppel tellijaga (töökoosolek 13.08.2013 Maanteeametis), on betoonkihtide jääkväärtuseks pärast 40 aastast perioodi võetud 25% (Soome analoogilistes arvutustes loeti betoonkatendi jääkväärtuseks 50%). Tavapärase asfaltbetoonkatendi (tüüp AB) puhul on katendi elueaks arvestatud 20 aastat.

Vastavalt lähteülesandele on eeldatud, et vaadeldaval perioodil jätkub Eestis naastrehvide kasutamine. Tasuvusarvutuses on ühe stsenaariumina võrreldud naastrehvide keelustamise suhtelist mõju betoonist ja asfaltbetoonist kulumiskihiga katenditele.

4.2. Lähteandmed

Tasuvusarvutuses on vaadeldud 3 katendikonstruktsiooni:

- Tüüp BET - katend betoonkattega ilma AB (asfaltbetoon) kulumiskihita;
- Tüüp AB+BET - katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga;
- Tüüp AB - katend AB kulumiskihiga.

Lihtsustamise eesmärgil on neid nimetatud vastavalt tüüp: BET; AB+BET ja AB

Kõik kolm katendikonstruktsiooni on Eesti oludesse tehniliselt sobivad konstruktsioonid. Asfaltbetoonist katendid on arvutatud Excel-rakendusega KAP, betoonkatendi konstruktsioon on valitud vastavuses teiste riikide kogemustega (plaadi paksus vastab Austraalia lubatud miinimumile ja Saksa kataloogimeetodil keskmise koormusega katendile, aluskihtide paksused on valitud lähtuvalt funktsionaalsest ülesandest ja tehnoloogilisest miinimumist ning vastavuses Soome katendite projekteerimise juhendiga on eeldatud aluspinnase ebaühtlust, millest tuleneb nõue kogu külmumissügavuse ulatuses külmakindlate materjalide kasutamiseks).

Tavapärane, asfaltbetoonist kulumiskihiga ilma betoonkihita katend on võetud võrdlusesse hindamaks betoonkihiga katendikonstruktsioonide suhtelist maksumust selle katendikonstruktsiooni suhtes.

Tasuvusarvutuses kasutatud lähteandmed on esitatud Lisas 4.

4.2.1. Ehitusmaksumus

Ehitusmaksumused on esitatud ühe kilomeetri 2+2 ristlõikega tee maksumusena. Eeldatud on, et ühikhinnad kehtivad ehitusmahule 10 kilomeetrit või enam.

Katendikonstruktsioonide detailsed ehitusmaksumused on esitatud Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6.

Katendikihtide ehitusmaksumuste allikana on kasutatud Maanteeameti 2011.a ehitushindade statistikat (allikas: www.mnt.ee), kuna 2012. aasta ehitushindade statistikat ei ole veel avaldatud. Turukonkurents kujunenud betoonkatendite ehitamise ühikhinda Eestis käesolevaga kasutada ei ole. Betoonkihi ehitushinna määramisel on arvestatud Eesti ettevõtjate hinnanguid. Betoonkihi ehitushinna võimalikke muutusi on analüüsitud tundlikkusanalüüsis.

Tabel 4. Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihita, detailne maksumus

Katendikiht	Katendikihi pak-sus, m	Ühik-maksu-mus	Ühik	Katendikihi maksumus, 2+2 ristlõige, EUR/km	Ühikmaksu-muse allikas
Betoon M45 (tardkivikillustik LA I-klass)	0,25	200	EUR/m ³	1 384 800	Eesti ettevõt-jad
AC 32 base	0,05	4,86	EUR/m ²	114 307	MA 2011
Kiilutud paekivikil-lustik	0,3	6,12	EUR/m ²	150 307	MA 2011
Kruusliiv	0,3	2,92	EUR/m ²	74 635	MA 2011
Jäme kerge saviliiv	0,87	2,84	EUR/m ³	66 810	MA 2011
KOKKU				1 790 860	

Tabel 5. Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga, detailne maksumus

Katendikiht	Katendikihi pak-sus, m	Ühik-maksu-mus, EUR	Ühik	Katendikihi maksumus, 2+2 ristlõige, EUR/km	Ühikmaksu-muse al-likas
SMA	0,06	13,5	EUR/m ²	311 580	MA 2011
Betoon M45 (tardkivikillustik LA II-III klass)	0,2	190	EUR/m ³	1 015 520	Eesti ette-võtjad
AC 32 base	0,05	4,86	EUR/m ²	114 307	MA 2011
Kiilutud paekivikil-lustik	0,3	6,12	EUR/m ²	150 307	MA 2011
Kruusliiv	0,3	2,92	EUR/m ²	74 635	MA 2011
Jäme kerge saviliiv	0,86	2,84	EUR/m ³	66 042	MA 2011
KOKKU				1 732 392	

Tabel 6. Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga, detailne maksumus

Katendikiht	Katendikihi pak-sus, m	Ühikmaksu-mus, EUR	Ühik	Katendikihi maksumus, 2+2 ristlõige, EUR/km	Ühikmaksu-muse al-likas
SMA	0,04	9	EUR/m ²	207 720	MA 2011
AC bin	0,05	7,51	EUR/m ²	174 683	MA 2011
AC 32 base	0,08	7,77	EUR/m ²	182 750	MA 2011
Tardkivikillustik	0,12	5,78	EUR/m ²	138 258	MA 2011
Paekivikillustik	0,2	4,08	EUR/m ²	100 205	MA 2011
Kruusliiv	0,3	2,92	EUR/m ²	74 635	MA 2011
Jäme kerge savi-liiv	0,44	2,84	EUR/m ³	33 789	MA 2011
KOKKU				912 040	

4.2.2. Perioodilise hoolde olemus ja maksumus

Betoonist kulumiskihiga katendi (tüüp BET) puhul on perioodilise hoolde olemuseks betoonikihi teemantfreesimine, mis toimub intervallidena 12-10-10 aastat (eksperthinnag). Teemantfreesimise ühikhindadeks olid konsultandil kasutada Rootsi ja Austraalia andmed: 60SEK/m²=6,88

EUR/m², (Dahlin&Eliasson 2007), 12 AUD/m²=8,29 EUR/m² (Arvo Tinni, 2013). Arvutustes on kasutatud ühikhinda 8,29 EUR/m².

Tüüp AB+BE ja tüüp AB puhul on perioodilise hoolde olemuseks asfaltbetoonist kulumiskihi taastamine (freesimine ja uue kulumiskihi paigaldus) iga 5 aasta järel. Tööde ühikhinnad on võetud Maanteeameti 2011.a ehitushindade statistikast (allikas: www.mnt.ee).

Tüüp AB puhul toimub 20ndal kasutusaastal kõigi asfaldikihtide vahetus. Asfaldikihtidest allapoole jääv alus rekonstrueeritakse kompleksstabiliseeritud aluseks. Detailne maksumus on esitatud Tabel 7.

Tabel 7. Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga investeering pärast 20 aastat, detailne maksumus

Katendikiht	Katendikihi paksumus, m	Ühikmaksumus, EUR	Ühik	Katendikihi maksumus, 2+2 ristlõige, EUR/km	Ühikmaksumuse allikas
KMA	0,04	9,00	EUR/m ²	207 720	MA 2011
AC bin	0,05	7,51	EUR/m ²	174 683	MA 2011
AC 32 base	0,06	5,83	EUR/m ²	137 122	MA 2011
Kompleksstabiliseerimine	0,15	3,33	EUR/m ²	79 321	MA 2011
KOKKU				598 845	

4.2.3. Muud võrreldavad maksumused

Kattemärgistus

Betoonkatte puhul on kattemärgistuseks värv, mida uuendatakse iga 2 aasta järel. Asfaltbetoonkatete puhul on arvestatud, et kattemärgistus plastikuga teostatakse intervalliga 5 aastat.

Valgustuskulud

Betoonkatte puhul on võimalik vähendada valgustuse kulusid kuni 30%. Valgustuskulude allikaks on Tallinna lähiümbruse riigimaanteede valgustuskulude statistika. Tasuvusarvutuses on arvestatud 30% valgustuskulude vähenemine betoonkattega tee puhul.

Rutiinse hoolde kulud

Soome kogemuste järgi ei ole otstarbekas käsitleda tasuvusarvutustes talihooldekulude erisusi, sest kui esimeste külmade perioodiks on betoonkattes suveperioodil salvestunud soojusenergia ja seetõttu tekib esimene libedus hiljem, siis kompenseeritakse see kevadperioodil, kui asfaltkate sulab kiiremini ja betoonkatend võib vajada jäätõrjet ka siis, kui asfalt seda enam ei vaja. Asfalt- ja betoonkattel puuduvad märkimisväärsed erisused mis mõjutaksid talihooldust.

Tasuvusarvutuse mõistes ei ole eristatud betoonkatte ja asfaltbetoonkatte rutiinse hoolde kulude erinevusi.

Haardetegur-liiklusohutus

Konsultandi poolt läbitöötatud põhjamaade betoonteid puudutavates aruannetes ei olnud täheldatud erinevust betoon- ja asfaltbetoon katete liiklusohutuse tasemes.

Tasuvusarvutuse mõistes ei ole eristatud betoonkatte ja asfaltbetoonkatte haardetegurist (liiklusohutuse tase) tulenevate kulude erinevusi.

Veeretakistus

Veeretakistus on betoonteel väiksem põhjusel, et koormatud sõiduki ratta poolt põhjustatud katendi deformatsioon on väiksem. Hinnanguliselt on võimalik kütusekulu sääst 1,1%. Tasuvusarvutuses on arvestatud kütusesäästuga betoonkattega teel.

Kütusesäästu arvutus on esitatud Tabel 8.

Tabel 8. Veeretakistus. Kulude kokkuvõid betoonkate võrrelduna AB kattega.

Kuluartikkel	Kogus	Märkused
Autokilomeetrite arv aastas	5475000	15000 autot ööpäevas
Keskmine kütusekulu 1 km tee läbimiseks, liitrit	0,1	Keskmine kulu 10 liitrit 100km-le
Kütusekulu aastas 1 kilomeetrise lõigul, liitrit	547500	
Kütuse maksumus ilma maksudeta, EUR/liiter	0,6	Arvestatud kütuse hinnaga 1 EUR/liiter (ilma KM-ta) , pliivaba bensiini aktsiisimäär 0,4 EUR/liiter
Kütuse kokkuvõid betoonkatte puhul, %	1,1%	VTI (Rootsi)
Kütuse kokkuvõid 1 km lõigul betoonkatte puhul aastas, EUR	3613	

Müra

Müratekke erinevus asfaltbetooniga on 0,4 dB pindmiselt karestatud betooni puhul ja 3,8 dB süvakarestatud betooni puhul (allikas: *The Effects of Road Surface Texture on Traffic and Vehicle Noise. Australian Road Research Board. Research Report ARR 177.*)

Müra mõju erinevus ei ole erinevate katete puhul oluline tegur. Seetõttu ei ole tasuvusarvutuses eristatud betoonkatte ja asfaltbetoonkatte müratasemest tulenevate kulude erinevusi.

4.3. Tasuvusarvutuse tulemused

Tasuvusarvutuse tulemused, diskonteeritud kulud, on esitatud Tabel 9. Käesolevas analüüsis kasutatud algandmete korral on betoonkattega katendi diskonteeritud kulu ca 18% kõrgem, võrrelduna asfaltbetoonist katendiga. Kõige suurem mõju tulemusele on ehitusmaksumusel.

Tabel 9. Tasuvusarvutuse tulemused. Diskonteeritud kulud

	Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihiga	Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga	Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga
Diskonteeritud kulud (diskontomäär 6%), EUR	1 979 843	2 240 226	1 684 670
Erinevus katend AB kulumiskihiga	18%	33%	-

4.4. Tundlikkusanalüüs

Vastavalt lähteülesandele soovis tellija testida hinna ja diskontomäära muutuste mõju. Tundlikkusanalüüs on teostatud *Ceteris paribus* printsiibil, ehk korraga muudetakse ühte muutujat jättes teised muutujad samaks.

Paigaldatud asfaltbetooni ja betooni hinna muutuste mõju

Vastavalt lähteülesandele tuli teostada tundlikkusanalüüs asfaltbetooni ja betooni hinna mõjule tasuvusanalüüsi tulemustele 30%, 50% ja 100% hinnakasvu korral. Konsultant lisas tundlikkusanalüüsi hinnalanguse -30%.

Paigaldatud asfaltbetoonkatte hinna 50% kasvamisega on asfaltbetoonkatendi ja betoonkatendi diskonteeritud kulud võrdsed (vt Tabel 10).

Tabel 10. Diskonteeritud kulud (6%) paigaldatud asfaltbetooni hinna muutuste korral

Paigaldatud asfaltbetooni hinna muutus	Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihita, EUR	Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga, EUR	Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga, EUR
30%	2 013 301	2 364 886	1 902 813
50%	2 035 607	2 447 994	2 048 242
100%	2 091 371	2 655 761	2 411 813
-30%	1 946 384	2 115 565	1 466 527

Paigaldatud betoonikihi 30% hinna vähenemise korral on asfaltbetoonkatendi ja betoonkatendi diskonteeritud kulud võrdsed (vt Tabel 11).

Tabel 11. Diskonteeritud kulud (6%) paigaldatud betoonikihi hinna muutuste korral

Paigaldatud betoonikihi hinna muutus	Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihita, EUR	Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga, EUR	Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga, EUR
30%	2 317 628	2 496 943	1 684 670
50%	2 542 818	2 668 087	1 684 670
100%	3 105 794	3 095 949	1 684 670
-30%	1 642 057	1 983 509	1 684 670

Diskontomäära muutuste mõju

Vastavalt lähteülesandele tuli teostada tundlikkusanalüüs diskontomäära muutuste mõjule tasuvusanalüüsi tulemustele.

Tasuvusarvutuses kasutatav diskontomäär on 6%. Diskontomäära vähenemisel (diskontomäär 4%) vähenevad betoonkattega katendi kulud suhteliselt kiiremini võrrelduna asfaltbetoonkatendi kuludele (Tabel 12). See on peamiselt tingitud asfaltbetoonkatendi suurematest perioodilise hoolde kuludest vaadeldava 40-aastase perioodi kestel.

Tabel 12. Diskonteeritud kulud erinevate diskontomäärade korral

Diskontomäär	Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihita, EUR	Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga, EUR	Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga, EUR
4%	2 087 718	2 406 819	1 950 736
8%	1 897 680	2 119 506	1 506 411

4.5. Naastrehvide keelustamise mõju

Naastrehvide keelustamisel väheneb kulumine kõigil kattetüüpidel. Betoonkatte puhul tuleb naastrehvide keelustamisel teostada teemantfreesimine hinnanguliselt iga 20 aasta järel, et tagada katte haardetegur (eksperthinnang, Arvo Tinni).

Katendi, mis koosneb AB kulumiskihist ja teistest AB kihtidest, kulumiskihi taastamisintervalliks naastrehtide keelustamise korral on 5 aasta asemel 7 aastat. Roobaste tekkes jääb ära naastrehtide mõju, kuid plastne deformatsioon toimub kõigis kihtides.

Asfaltbetoonkihiga kaetud betoonkatendi puhul on eksperthinnanguna arvestatud uue kulumiskihi taastamisintervalliks naastrehtide keelustamise korral 5 aasta asemel 10 aastat. Betoonkiht ei deformeeru, plastne deformatsioon toimub üksnes kulumiskihis.

Tabel 13. Naastrehtide keelustamise majanduslik mõju vaadeldud katenditüüpidele

	Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihita	Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga	Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga
Naastrehtid keelatud, diskonteeritud kulud (diskontomäär 6%), EUR	1 688 001	1 896 774	1 481 044
Naastrehtid lubatud, diskonteeritud kulud (diskontomäär 6%), EUR	1 979 843	2 240 226	1 684 670
Kulude vähenemine tulenevalt naastrehtide keelustamisest, %	15%	15%	12%

Naastrehtide keelustamine vähendab kulusid ühtlaselt kõigil kolmel vaadeldaval katendikonstruktsioonil (vt Tabel 13).

4.6. Liikluskoormuse mõju katendikonstruktsioonidele

Uurimistöös vaadeldav betoonkatendi konstruktsioon võtab vastu potentsiaalselt kasvava liikluskoormuse ning katendikonstruktsiooni muutma ei pea.

Elastse katendi puhul (asfaltbetoon) on tarvilik liikluskoormuse kasvades katendikonstruktsiooni tugevdada. Konsultant teostas katendiarvustusprogrammiga KAP katendiarvutused erinevatele koormussagedustele ning arvutas vastavate katendite ehitusmaksumused (vt Tabel 14). Katendiarvutused on esitatud Lisas 3.

Tasuvusanalüüsis on tüüp AB katendi koormussagedusena kasutatud 3529 normtelge ööp/rajale. 1,5 kordse koormussageduse tõusu korral (5293 normtelge ööp/rajale) suureneb elastse katendi ehitusmaksumus ca 7% ning kogu diskonteeritud kulude määr 4%. Koormussageduse 3529 normtelge ööp/rajale on arvestatud kulumiskihi taastamisega iga 5 aasta järel ja koormussageduse 5293 normtelge ööp/rajale 4 aasta järel.

Tabel 14. Katendi tüüp AB maksumused erinevate koormussageduste korral

Koormussagedus, normtelge ööp/rajale	1764	2376	3529	4411	5293
Katendikonstruktsiooni, 2+2, ehitusmaksumus, EUR/km (dimensioneeritud KAP-ga)	879 760	903 297	912 214	921 953	980 699
Hinnaerinevus võrrelduna väikseima koormussagedusega, EUR	-	23 537	32 454	42 193	100 940
Hinnaerinevus võrrelduna väikseima koormussagedusega	0%	3%	4%	5%	11%

Ülaltoodud eeldustel ei muuda koormussageduse 1,5 kordne tõus elastset katendikonstruktsiooni (tüüp AB), võrrelduna betoonkatendiga, oluliselt kallimaks. Betoonkatendi (tüüp BET) diskonteeritud kulud jäävad elastse katendi (tüüp AB) vastavatest kuludest ca 13% kõrgemaks.

4.7. Kokkuvõte

	Tüüp BET. Katend betoonkattega ilma AB kulumiskihita	Tüüp AB+BET. Katend betoonkihiga ja AB kulumiskihiga	Tüüp AB. Katend AB kulumiskihiga
Ehitusmaksumus	1 790 860	1 732 392	912 040 598 845
Diskonteeritud kulud			
- 4%	2 087 718	2 406 849	1 950 736
- 6%	1 979 843	2 240 226	1 684 670
- 8%	1 897 680	2 119 506	1 506 411
Asfaldi hinna muutus 50%	2 035 607	2 447 994	2 048 242
Betooni hinna muutus - 30%	1 642 057	1 983 509	1 684 670

Võrdlus on teostatud üksikute teguritena sest erinevate mõjurite samaaegse toimimise variante on liialt palju.

Diskontomäära muutmine etteantud piires ($\pm 2\%$) ning naastrehvide võimalik keelustamine ei tee betoonkatendit tasuvaks. Betoonkatend võib kujuneda tasuvaks, kui asfaldi hind tõuseb 50% või betooni hind langeb 30%. Samas tuleb juhtida tähelepanu asjaolule, et betooni hind arvutustes on valitud tõenäolise alammäära lähedale (Austria hinnangul 45-85 €/m², kui valitud väärtus on 50 €/m²).

5. BETOONTEE LÕIKUDE VALIK EESTIS

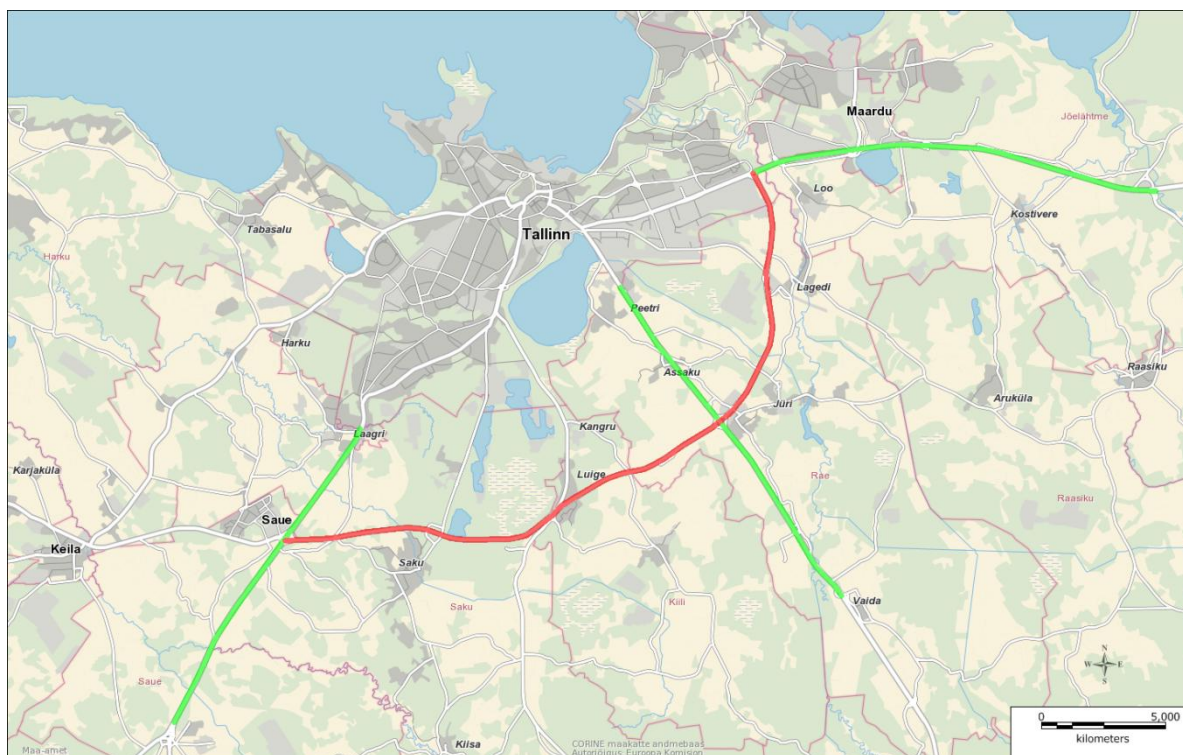
Vastavalt lähteülesandele tuleb kaardistada teelõigud, kus asuvad Eestis tasuvuspiiri ületava liiklussagedusega kohad, määrata seal pinnasetüübid ja hinnata nende täiendavat mõju ehitusmaksumusele.

Käsitleda täiendavaid riske, mis betoonteede ehitamisega võivad kaasneda (vähene kogemus, kohalikud pinnaseolud, külmakerkeriskid jne).

Konsultant arvutas vastavalt elastsete teekatendite projekteerimise juhendile (KAP) maksimaalse koormussagedusele (10000 normtelge enamkoormatud rajale/ööp) vastava asfaltkatendi, mille arvutuslik maksumus osutus oluliselt väiksemaks betoonkatendi maksumusest. Sellest tulevalt ei ole võimalik määrata lähteülesandes kirjeldatud tasuvuspiiri.

Hoolimata eeltoodust teostas konsultant alljärgneva analüüsi.

Töö käigus analüüsiti Eesti riigiteede liikluskõormust. Lisas on toodud teelõigud, kus liiklussagedus 2012. aasta liiklusloenduste andmetel ületas 10 000 AKÖL.



Joonis 12. Betoonkatendi ehituseks sobilike teelõikude valimi asendiskeem

Betoonkatendi ehituseks sobilike teelõikude valikul on kriteeriumiteks võetud kas liiklussagedus vähemalt 15 000 AKÖL või raskeliikluse koormus vähemalt 1000 autot ööpäevas (Joonis 12).

Liiklusproгноos (Tabel 15) on koostatud 2052. aastaks kahel meetodil (projekteerimismõnede järgsel kohustuslikul meetodil - Norm ning baasproгноosi alusel - Baas) 40 aasta arvestuses. Raskeliiklusega seonduvat proгноosi on võimalik koostada vaid baasproгноosi järgi. Baasproгноosi puhul ei ole arvestatud kohalikke tegureid, juhitud on ainult maakonnakeskmisest proгноositavast liikluse kasvutempost. Edasises analüüsis on kasutatud eeltoodud kahe proгноosi aritmeetilist keskväärtust.

Liiklussageduse alusel on sobilikud T4 kuni Ääsmäeni, T2 kuni Vaidani ja T1 kuni Jõelähtmeni. Koormussageduse alusel on neist kõigist suurem koormus Tallinna ringteel. Ettepaneku juures on arvestatud et katselõik peaks olema vähemalt 10 km pikkune. Lühema lõigu rajamine ei kujune tasuvaks seetõttu, et vajaliku seadmepargi objektile vedu paigaldusega on liialt kulukas.

T1 Vao-Maardu teelõiku ei ole välistatud valimist seetõttu, et tõenäoline töö ajastamine võib langetada ajale, kui hiljuti valminud teelõik on amortiseerunud. Samal põhjusel ei ole valimist välja võetud Tallinna Ringtee Luige sõlmega seonduvat teelõiku.

Tabel 15. Valitud teelõigud võimalike betoonkatendite rajamiseks, liiklus- ja koormusproгноos

Teelõik		2012		Proгноos 2052			
Maantee	Km	AKÖL	Raske auto	Norm AKÖL	Baas AKÖL	Keskmine AKÖL	Raske auto
T1 Tallinn - Narva	10-11	26520	2280	32836	43962	38399	3357
	11-14	21342	1742	27476	35397	31437	2564
	14-26	14753	1391	27075	24434	25754	2051
T2 Tallinn - Tartu - Võru - Luhamaa	5-9	18053	1327	39558	29954	34756	1936
	9-12	14992	1078	25382	24883	25133	1575
	12-21	11159	1473	17691	18402	18046	2177
T4 Tallinn - Pärnu - Ikla	13-14	31411	1847	60115	52209	56064	2685
	14-18	19593	951	33954	32609	34574	1381
	18-27	12778	1754	22659	21067	25584	2600
T11 Tallinna ringtee	0-5	10605	2087	17435	17351	17393	3802
	5-8	11134	3041	28501	18027	23264	4470
	8-10	9850	2270	21359	16067	18712	3369
	10-11	12630	2210	38214	20729	29471	3274
	11-15	13127	2380	32739	21526	27132	3523
	15-19	8799	2164	18186	14328	16257	3214
	19-24	6863	1947	14432	11134	12783	2899
	24-28	7040	2144	11085	11384	11234	3183
	28-30	7732	1828	11837	12607	12222	2717

Valitud teed võib liigitada kahte gruppi: ühte kuuluvad Tallinnast väljuvad maanteed, mille puhul on välja ehitatud 2+2 ristlõike, ja teise gruppi Tallinna ringtee, kus on kahe rajaline maantee mida planeeritakse lähiaastatel laiendada.

Olemasoleva 2+2 ristlõikega teede puhul on kaks eelist: tööde korralduse mõttes on võimalik ühe suuna sulgemine ehitustöödeks ning muldkeha on aastate jooksul saavutanud oma lõpliku vajumi. Enne betoonkattega tee projekteerimist tuleb täpsustada võimalikku külmakerget ja viia läbi olemasoleva tee möötmised nii suvel kui ka külma talve lõpul (varakevadel). Kui külmakerget ei ole täheldatud, võib muldkeha säilitada. See võimaldab kokkuhoidu ehitusmaksumuses.

Tallinna ringteel tuleb igal juhul vähemalt üks niit ehitada välja uues asukohas. Siit tulenevalt on tegemist igal juhul mahuka tööga, eriti tuleb tähelepanu pöörata pinnasevee taseme alandamisele allapoole külmumissügavuse piiri (arvestades 174 cm sügavusega) ning külmakartlike pinnaste asendamisele kogu külmumistsoonis.

Betoontee (BET) konstruktsioonis on võimalik piirduda kokku 90 cm konstruktsiooniga eeldusel, et selle alla jääv vana muldkeha on vähemalt 87 cm ulatuses külmakindlast materjalist. Sama võimalus on ka asfaldist kulumiskihiga variandil (AB+BET). Asfaltbetoonkatendi kokkuhoiuvõimalus piirdub vaid 44 cm jämeda kerge saviliivaga samuti eeldusel, et olemasolev konstruktsioon on külmakindlast materjalist.

6. SOOVITUSED EDASPIDISEKS TEGEVUSEKS

Betoonplaadi M45 kulumiskindluse määramine

Naastrehvide omadused on viimaste aastakümnetega muutunud ning varasemate laboratoorsete tööde tulemused ei pruugi kajastada adekvaatselt tänast olukorda. Seetõttu peame otstarbekaks viia läbi laboratoorsed katsetused võimalike täitematerjalide ja betoonimarkide vahel, et täpsustada eeldatavat kulumiskindlust. Betooni M45 kasutamine võimaldaks planeerida katendi teemantlihvimist, kõrgtugevate betoonide puhul puudub selleks võimalus või adekvaatsem info töönaolise teenuse maksumuse kohta.

Kuigi olemasoleval betoontee lõigul on raske määrata roopasügavust, on otstarbekas tee rekonstrueerimisel uurida vana katendi betooni parameetreid (survetugevus) ja võimalusel kasutatud kivimaterjali omadusi.

Katselõigu rajamine

Kui laboratoorsete katsete abil on võimalik kindlaks teha, et betooni (M45) kulumiskindlus on vähemalt kaks korda parem kui asfaltbetoonil (SMA), kaaluda katselõigu rajamist pikkusega vähemalt 10 km.

Betoonkatendi plussid ja miinused võrreldes asfaltbetoonist katendiga

	Betoonkatend	Asfaltbetoonkatend
+	- Väiksemad valgustuskulud - Väiksem haardetegur ja siit tulenevalt väiksem kütusekulu - Roobaste teke ca kaks korda aeglasem, roopad ainult naastrehvide kulumisest	- Väiksemad investeeringukulud, investeering enam hajutatud - Arvutuslik külmumispiir väiksem – asfaltbetoon käitub elastselt, deformatsioon taastub - Eestis on piisavalt asfaltkatete kogemusi - Aluse ebatasasusi võimalik kompenseerida ülakihtides - Ülekoormuse järel katendi remont võimalik
-	- Suuremad investeeringukulud, investeering kontsentreeritud - Arvutuslik külmumispiir suurem – nõuded aluspinnasele kõrgemad, betooni deformatsioon ei taastu - Eestis puudub kogenud betoonipalgatusbrigaad - Väga kõrged nõuded aluse tasetasale - Ülekoormus purustab katendi	- Suuremad valgustuskulud - Suurem haardetegur ja siit tulenevalt suurem kütusekulu - Roobaste teke nii naastrehvide kulumisest kui koormusest plastse deformatsiooni näol ja aluse purunemisest

7. KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli välja selgitada, kas Eestis on majanduslikult tasuv ehitada betoonkattega teid ning leida tasuvusele vastav liiklussageduse piir.

Töö käigus oli vajalik selgitada välja Soome, Rootsi ja Norra viimaste aastakümnete kogemus betoonkatte ehituse ja hoolde vallas, seejärel arvestades põhjamaade kogemust, dimensioneerida kohalikele oludele vastav betoontee konstruktsioon ning võrrelda seda asfaltbetoonist katendi konstruktsiooni ehitus- ja hooldekuludega 40-aastaselt perioodil.

Põhjamaade kogemustest valiti kaks näidet – Rootsist E4 Uppsala-Mehedeby 23 km pikkune lõik ehitusaastaga 2006 ning Soomest E6 Lakalaiva-Alasjärvi 11 km pikkune lõik ehitusaastaga 1994. Mõlemal juhul on tegemist kõrgtugeva (M80) betooni kasutamisega ning Eestiga on sarnased nii kliimaatilised kui ka kasutustingimused (naastrehvide suur osakaal talvises liikluses).

Põhjamaades kasutatava kõrgtugeva betooniga (M80) on võimalik saavutada katendi vajalik tugevus plaadi paksusel vähemalt 220 mm. Hilisemal perioodilisel hooldusel tekkisid probleemid katte teemantlihvimisega (diamond grinding), kuna järelkivinenud betooni lihvimine oleks kujunenud sedavõrd kalliks, et otstarbekam oli roopasügavuse kriitilise piiri saabumisel katend katta asfaltbetoonist (SMA) kulumiskihiga. Kõrgemargilise betooni ja kulumiskindla kivimaterjaliga ei olnud võimalik tagada katendi kulumiskindlust tasemel, mis võimaldaks loobuda teemantlihvimisest.

Arvestades ka teiste riikide kogemustega, kus betoonkatendid on enam levinud (Saksamaa, Austraalia), valiti Eestis kasutatava betoonkonstruktsiooni (armeermata betoonplaat) paksuseks 250 mm. Kavandatud katend on ette nähtud rajada pideva valamise meetodil kahekihilisena (ülakiht kõrgtugeva kivimaterjali LA11, Nordic 6 kasutamisega) märg-märjal meetodil. Betooni margiks valiti M45, et võimaldada betoonplaadi hilisemat teemantlihvimist. Plaatide vahekohtadesse vedelasse betooni on planeeritud paigaldada tüüblid (terasvardad). Betooni kivilinemisel lõigatakse katendi ülakihti nii piki- kui ka põikvuugid, liigendades katendi 4,5*5,0m plaatideks, ning paigaldatakse EPDM kummist vuugitihendid. Betoonplaadi aluseks on valitud asfaltbetoon killustikalusel (pealiskihis peeneteraline tihe segu). Ebaühtlase aluspinnase tõttu asendatakse aluspinnas kogu külmumissügavuse ulatuses külmakindla materjaliga.

Alternatiivse betoonkonstruktsioonina on võrreldud õhemat (200 mm) betoonplaati SMA kulumiskihiga.

Betoonkonstruktsioonide eluea kulud on võrreldud tavapärase asfaltbetoonist katendikonstruktsiooniga, mis dimensioneeriti kasutades kohustuslikku katendiarvutustarkvara (KAP).

Töö lähteülesandes etteantud lähtetingimustel ning valitud konstruktsioonide korral osutusid betoonkatendi elueakulud võrreldes asfaltbetoonist katendikonstruktsiooniga 18% kallimaks. Naastrehvide keelustamisel jääb konsultandi arvutuste kohaselt betoonkonstruktsioonist katend endiselt 14% asfaltbetoonist katendikonstruktsioonist kallimaks. Asfaltbetoonist katendi kallinemisel 30% võrra on betoonkatendi ja asfaltbetoonkatendi hinnad ligilähedased.

Elastse ehk asfaltbetoonist katendi kihtide paksus kasvab koos koormussageduse kasvuga. KAP-ga projekteeritud asfaltbetoonkatendite maksumused jäävad ka koormuse ülempiiril, 100 miljonit 10-tonnist telge katendi tööea jooksul, enamkoormatud sõidurajal betoonist katendi maksumusest väiksemaks ning seega puudub tasuvuspiir betoontee valikuks.

8. SUMMARY

In accordance with Terms of Reference, the Study had to find out, whether concrete pavements would be cost-effective for the road lifecycle of 40 years in Estonia and if, from which traffic level.

From Nordic experience, two examples were selected – E4 Uppsala-Mehedeby (section of 23 km, built 2006) from Sweden and E6 Lakalaiva-Alasjärvi (section of 11 km, built 1994) from Finland. Both cases used high-strength concrete and are located in similar conditions to Estonia (climatic conditions and high share of studded winter tires in traffic).

With high-strength concrete, used in Nordic countries, necessary slab strength can be achieved with slab thickness of 220 mm, but diamond grinding after re-hardening of M80 concrete is too expensive, so after rutting exceeding permitted level, the pavement has to be covered with new wearing layer from SMA. Use of high-strength concrete and excellent stone materials does not exclude the need for diamond grinding to eliminate ruts.

Based also on experience of other countries with high share of concrete pavements (Germany, Australia), non-reinforced concrete plate thickness 250 mm was selected. Construction technology is based on wet-wet slipform paving of two-layer construction (top layer with high strength stone material, LA 11, Nordic 6) from concrete M45, which would enable diamond grinding if necessary. Dowel bars will be installed during placement and joints sawed within 5-15 hrs after placement. Sealing strips from EPDM rubber are used to protect joints. Concrete slab is placed on asphalt layer on crushed stone base. Due to uneven ground material, the frost-safe materials will be used on the whole frost depth.

In CBA analyse, comparison was provided with concrete base pavement (200 mm concrete slab, wearing layer from SMA) and standard asphalt pavement (dimensioned with Excel-application KAP).

Asphalt pavement, designed in accordance with current instructions, for the traffic levels used for concrete pavements, has much lower bearing capacity and cost. At the maximum load of 100 million 10-ton axles per lane (German top level for type-constructions) the asphalt pavement remains considerably cheaper from concrete and there are no break-even levels for cost-benefit comparison.

9. KASUTATUD KIRJANDUS

1. Tierakenteen suunnittelu, suunnitteluvaihen ohjaus. Tiehallinto, Helsinki 2004. <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf>
2. Cement-treated and Concrete Pavements: their applicability in Finland and elsewhere. The Finnish Association of Building Materials Industry; Roads and Waterways Administration, Helsinki 1989. TVH 723869
3. Kehä II, Espoo. Betonipäällysteseelvitys. Tielaitos, Uudenmaan tiepiiri, Helsinki 1990
4. Vt 1 betonipäällysteseelvitys välillä Turku-Piikkiö, Tielaitos - Turun Tiepiiri / Turun Viatek, Turku 1991
5. Vt 9 Lakalaiva-Alasjärvi betonipäällysteseelvitys, Tielaitos - Hämeen tiepiiri, Tampere 1992
6. Kantatien 50 parantaminen välillä Bemböle-Vanhakartano, Espoo. Päällysteseelvitys. Tielaitos - Uudenmaan tiepiiri / Maa ja Vesi OY / AL-Engineering OY, 1993
7. Betonipäällysten seuranta Vt 4 Kempele-Kiviniemi. Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Tiehallitus 23/1991, Oulu
8. Betonipäällysten seuranta Vt 4 Kempele-Kiviniemi. Seurantaraportti nro 2. Tiehallitus 15/1995. Oulu
9. Betonipäällysten seuranta. Vt 9 Lakalaiva-Alasjärvi. Seurantaraportti nro 1. Tiehallitus 49/1998. Helsinki
10. Tutustumismatka Falkenbergin betonitiekprojektiin 17.5-20.5.1993. Taustatietoja projektista. Turun Viatek / P. Ala-Tuuhonen
11. Betonipäällysteen kunnon seuranta ja kunnossapito-ohjeet. Tiehallitus 1992
12. High-Performance Concretes. A State-of-Art Report (1984-1994). FHWA-RD-97-030. Federal Highway Administration (web, 2012)
13. Maanteeameti organisatsioon poolt 2011. ja 2009.a tellitud teeremonditööde hindade tabel. www.mnt.ee
14. Accelerated wear testing of high strength road concrete in Norway. Dr.ing. Trine Tveter, The Norwegian Masonry and Concrete Research Institute. Oslo, 1993.
15. Talverehvide kasutamine Eestis ja selle majanduslik hinnang. TTÜ Teedeinstituut 2005, Maanteeamet 2005-8/L
16. Design of Concrete Pavements – Design Criteria for Plain and Lean Concrete. Johan Söderqvist, Licentiate Thesis, TRITA-BKN. Bulletin 87, 2006
17. Betongväg pa E20 vid Eskilstuna. VTI notat 57-2002
18. Functional Properties of Concrete Roads. Development of an Optimisation Model and Studies on Road Lightning Design and Joint Performance. Malin Löfsjögård. KTH Doctoral Thesis, Stockholm 2003
19. Evaluation of US and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods. FHWA / National Concrete Pavement Center / Iowa State University, June 2006
20. Composite Pavement Systems: SHRP2 R21 Study (Strategic Highway Research Program), Minneapolis 2011
21. 2008 Survey of European Composite Pavements. SHRP. TRB 2010
22. Design and Construction Guidelines for Thermally Insulated Concrete Pavements. L.Khazanovich, MnROAD Research Conference, 2011

23. Life Cycle Cost Analysis of Asphalt and Concrete Pavements, Asta Guciute Scheving, Master Thesis, Reykjavik 2011
24. Concrete Pavement Design Guidance Notes, Geoffrey Griffiths and Nick Thom, 2001
25. Concrete Pavement Design, Construction and Performance; Norbert Delatte, 2008
26. Žestkie pokrõtija aerodromov i avtomobilnõh dorog. Red: G.I.Glushkov. Moskva 1987
27. Nastarenkaiden vaikutus päällysteiden kulumiseen taajamanopeuksissa. Harri Heikkinen, Aalto-yliopisto 2012 (lisensiaattityön tiivistelmä).

LISA 1

SUURE LIIKLUSKOORMUSEGA TEELÕIGUD

Teeregistri andmetel on Eesti riigimaanteed enamkoormatud teelõigud (liiklussagedus üle 10 000 auto ööpäevas) alljärgnevad:

Põhimaanteed

- 1 - Tallinna-Narva: 10,4-26,4 ja 157,7-162,7
 - o **10,375-11,210 – 24240 (Väo-Maardu)**
 - o **11,210-13,840 – 24342 (Loo-Maardu)**
 - o 13,840-26,378 – 14753
 - o 157,724-162,742 – 11884
- 2 - Tallinna-Tartu-Võru-Luhamaa: 5,5-20,8; 183,6-185,3; 188,2-193,0
 - o **5,505-8,705 – 18053 (Peetri-Assaku)**
 - o 8,705-12,063 – 14992 (Assaku-Jüri)
 - o 12,063-20,798 – 11159 (Jüri-Vaida)
 - o 183,629-184,471 – 11840
 - o 184,471-185,349 – 12790
 - o 188,201-188,378 – 14346
 - o 188,378-190,586 – 14230
 - o 190,586-192,976 – 11480
- 3 - Jõhvi-Tartu-Valga: 1,8-3,6 (Jõhvi linn)
 - o 1,804-3,554 – 16860
- 4 - Tallinna-Pärnu-Ikla: 13,0-26,9; 120,7-122,7
 - o **13,040-13,740 – 31411 (Linna piir-Maksimarket)**
 - o **13,740-18,318 – 19593 (Maksimarket-Kanama)**
 - o 18,318-26,899 – 12778 (Kanama-Ääsmäe)
 - o 120,699-122,656 – 1005
- 8 - Tallinna-Paldiski: 11,3-13,6
 - o 11,300-12,156 – 13162
 - o 12,156-13,574 – 12000

- 11 - Tallinna ringtee: 0,0-8,4; 10,3-15,3; 30,0-32,8
 - o 0,000-4,843 – 10605
 - o 4,843-8,417 – 11134
 - o 10,325-11,073 – 12630
 - o 11,073-15,326 – 13127
 - o 29,999-32,773 - 10363

Tugimaanteed

- 15 - Tallinna-Rapla-Türi – 4,553-5,308 - 10992

Kõrvalmaanteed

- Viimsi-Randvere – 0,000-0,785 – 14256
- Tallinna-Rannamõisa-Kloogaranna – 2,612-6,375 – 14686
- Tallinna-Rannamõisa-Kloogaranna – 6,375-8,280 – 12599
- **Tartu-Ülenurme – 0,327-0,836 – 15667**

Eeltoodud loetelust on üle 15 000 AKÖL vaid kuuel lõigul. Tallinna-Narva osas on tegemist uusehitisega (Väo-Maardu). Lähitulevikus võiks betoonkatendi katselõiguna kõne alla tulla Tallinna-Tartu-Võru-Luhamaa osas km 5-8 ja kindlasti Tallinna-Pärnu-Ikla km 13-18 (Topi-Kanama). Tartu-Ülenurme tee osas on tegemist lühikese lõiguga, mille liiklus kahaneb oluliselt Tartu Idaringtee esimese lõigu valmimisel.

LISA 2

KOORMUSSAGEDUSE ALTERNATIIVSED PROGNOOSID

Austraalias eeldatakse betoonteede katendi projekteerimisel iga-aastast liikluse kasvu 4%, tava-pärane liikluse kasvutempo, mida kasutatakse nii ristlõike projekteerimisel kui ka asfaltkatetel on 2..2,5% aastas. Rootsi praktikas on eeldatud E-teedel esimese 10 aasta jooksul 2% tõusu, hiljem 1%. Madalama liigi teedel on kasvutempod poole aeglasemad.

Koormussageduse prognoos vastavuses Rootsi praktikaga – 10 aasta jooksul kasv 2%, edasi 1% aastas. Rajategur vastab 2+2 ristlõikele. Siirdetegurina on kasutatud Uppsala projekti tegurit (varem on Rootsis kasutatud väiksemat tegurit 1,3, kuid kogemused muuhulgas Falkenbergi projektis on sundinud siirdetegurit tõstma).

Tabel 16. Koormuse prognoos (Rootsi trend)

	Raskeliiklus (sõidukit ristlõikes)					Koormuse kasv	
	1000	1500	2000	2500	3000	aastane	10 aastaga
2012	1000	1500	2000	2500	3000	1,02	1,218994
2022	1219	1828	2438	3047	3657	1,01	1,104622
2032	1347	2020	2693	3366	4040	1,01	1,104622
2042	1487	2231	2975	3719	4462	1,01	1,104622
2052	1643	2465	3286	4108	4929	1,01	1,104622
Koormuse kasv 40 aastaga							1,64302
						0,45	rajategur
	9,356	14,033	18,711	23,389	28,067	miljonit raskesõidukit	
						2,45	siirdetegur
	22,921	34,382	45,842	57,303	68,764	miljonit telge	

Austraalias loetakse betoontee miinimumkoormuseks $1 \cdot 10^8$ ehk 100 miljonit telge, siit tulenevalt kui koormus on taandatud 10-tonniseks $(10/8)^4$, sobivad kõik valitud koormused betoonkatendi projekteerimiseks Austraalia kogemuste alusel. Üks raskesõiduk (üle 3,5 tonni) loetakse Austraalias keskmiselt võrdseks 2,6 normteljega (8-tonnine normtelg), kuid nii sõidukite koosseis kui ka normtelg on erinevad - Austraalias lubatakse eriti pikkade (ja raskete) autorongide kasutust, kuid samas on nende telgede arv oluliselt suurem kui Eestis.

Tabel 17. Koormuse prognoos Austraalia liiklusprognoosi järgi

	Raskeliiklus					Koormuse kasv	
2012	1000	1500	2000	2500	3000	aastane	10 aastaga
2022	1480	2220	2960	3701	4441	1,04	1,480244
2032	2191	3287	4382	5478	6573	1,04	1,480244
2042	3243	4865	6487	8108	9730	1,04	1,480244
2052	4801	7202	9602	12003	14403	1,04	1,480244
Koormuse kasv 40 aastaga							4,801021
						0,45	rajategur
	19,243	28,865	38,486	48,108	57,730	miljonit raskesõidukit rajale	
						2,45	siirdetegur
	47,146	70,719	94,292	117,864	141,437	miljonit telge rajale	
	2,441406	tegur, 10t teljekoormuse ümberarvutus 8-tonnisele teljele					
	115,102	172,653	230,204	287,755	345,306	miljonit 8-tonnist telge	

Järelikult on kogu valitud koormuse skaala vastav betoonkatendi projekteerimiseks Austraalia reeglite järgi.

LISA 3

ASFALTBETONIST KATENDIKONSTRUKTSIOONIDE ARVUTUS

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 1000

Koormussagedus: 1764 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve kattele: 0,6 MPa

Normhällbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: Baas: 1000 raskesõidukit, esimene katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe-pinged R_{max}	Lubata-vad tõmbe-pinged R_{lub}	Sise-hõõrde-nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	7,0	1400	800	2200	0,9712	1,0901			
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	30,0	280							
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
6	Jäme kerge saviliiv	46,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv		32,2					13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			0,0%	286,51	280,76	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0					286,51		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					253,84		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	7,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			8,9%	209,34		
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	30,0					160,21		
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0071	0,0205	63,5%	85,12		
6	Jäme kerge saviliiv	46,0	Nihkepinged	-0,0012	0,0063	117,4%	51,37		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0051	0,0063	16,1%			0,799
	Katendi kogupaksus	122,0					Parandustegur Δ		0,033

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 1000

Koormussagedus: 2376 normtelge ööp/rajaale

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve kattele: 0,6 MPa

Normhällbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: Baas: 1000 raskesõidukit, teine katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbepinged R_{max}	Lubata-vad tõmbepinged R_{lub}	Sise-hõõrdenurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastiksasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	5,0	1400	800	2200	1,0165	1,0394			
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	13,0	600							
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	19,0	280							
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
7	Jäme kerge saviliiv	46,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,2						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			7,5%	317,06	289,51	
1	Killustikmastiksasfalt - SMA	4,0					317,06		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					275,95		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	5,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			0,2%	230,20		
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	13,0					196,41		
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	19,0					133,48		
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0063	0,0191	65,0%	85,12		
7	Jäme kerge saviliiv	46,0	Nihkepinged	-0,0015	0,0059	122,8%	51,37		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0049	0,0059	14,2%			0,799
	Katendi kogupaksus	122,0					Parandustegur Δ		0,033

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 1500

Koormussagedus: 2647 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve kattel: 0,6 MPa

Normhõlbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

Lisainfo: esimene katend

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe-pinged R_{max}	Lubata-vad tõmbe-pinged R_{lub}	Sise-hõõrde-nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	1400	800	2200	0,9053	1,0216			
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	30,0	280							
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
6	Jäme kerge saviliiv	46,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv		32,2					13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			1,4%	302,68	292,68	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	4,0					302,68		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					265,61		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			9,4%	220,42		
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	30,0					160,24		
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0066	0,0187	62,9%	85,15		
6	Jäme kerge saviliiv	46,0	Nihkepinged	-0,0014	0,0057	122,6%	51,42		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0050	0,0057	10,4%			0,798
	Katendi kogupaksus	123,0					Parandustegur Δ		0,033

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 1500

Koormussagedus: 3565 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püskatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve katte: 0,6 MPa

Normhällbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: teine katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe-pinged R_{max}	Lubata-vad tõmbe-pinged R_{lub}	Sise-hõõrde-nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	6,0	1400	800	2200	0,9462	0,9741			
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	13,0	600							
5	Killustik (graniit või lubjakivi)	19,0	280							
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
7	Jäme kerge saviliiv	46,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,2						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			6,3%	326,53	301,42	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0					326,53		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					284,31		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	6,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			0,9%	238,12		
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	13,0					196,45		
5	Killustik (graniit või lubjakivi)	19,0					133,52		
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0059	0,0174	64,2%	85,15		
7	Jäme kerge saviliiv	46,0	Nihkepinged	-0,0016	0,0053	128,7%	51,42		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0048	0,0053	7,6%			0,798
	Katendi kogupaksus	123,0					Parandustegur Δ		0,033

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 2000

Koormussagedus: 3529 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve kattele: 0,6 MPa

Normhällbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: esimene katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe-pinged R_{max}	Lubata-vad tõmbe-pinged R_{lub}	Sise-hõõrde-nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	1400	800	2200	0,8975	0,9756			
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	32,0	280							
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
6	Jäme kerge saviliiv	44,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,2						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			0,2%	307,89	301,12	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0					307,89		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					269,35		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			6,0%	223,96		
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	32,0					163,42		
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0058	0,0174	64,6%	84,88		
6	Jäme kerge saviliiv	44,0	Nihkepinged	-0,0017	0,0053	130,0%	51,03		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0050	0,0053	4,6%			0,798
	Katendi kogupaksus	123,0					Parandustegur Δ		0,033

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 2000

Koormussagedus: 4753 normtelge ööp/rajae

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve katte: 0,6 MPa

Normhõlbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: teine katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbepinged R_{max}	Lubata-vad tõmbepinged R_{lub}	Sise-hõõrdenurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastiksasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	7,0	1400	800	2200	0,8826	0,9303			
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	12,0	600							
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	21,0	280							
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
7	Jäme kerge saviliiv	44,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,2						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			8,5%	342,24	309,86	
1	Killustikmastiksasfalt - SMA	4,0					342,24		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					299,37		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	7,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			3,1%	250,83		
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	12,0					196,37		
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	21,0					139,38		
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0051	0,0161	66,1%	84,88		
7	Jäme kerge saviliiv	44,0	Nihkepinged	-0,0019	0,0049	137,2%	51,03		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0048	0,0049	1,3%			0,798
	Katendi kogupaksus	123,0					Parandustegur Δ		0,033

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 2500

Koormussagedus: 4411 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve kattele: 0,6 MPa

Normhällbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: esimene katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe-pinged R_{max}	Lubata-vad tõmbe-pinged R_{lub}	Sise-hõõrde-nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	1400	800	2200	0,8870	0,9414			
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	34,0	280							
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
6	Jäme kerge saviliiv	43,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,3						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			0,7%	315,84	307,67	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	4,0					315,84		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					275,07		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			3,8%	229,38		
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	34,0					167,73		
5	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0051	0,0164	66,9%	84,74		
6	Jäme kerge saviliiv	43,0	Nihkepinged	-0,0020	0,0050	137,5%	50,84		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0049	0,0050	0,9%			0,798
	Katendi kogupaksus	124,0					Parandustegur Δ		0,034

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 2500

Koormussagedus: 5941 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve katte: 0,6 MPa

Normhõlbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: teine katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbepinged R_{max}	Lubata-vad tõmbepinged R_{lub}	Sise-hõõrdenurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	7,0	1400	800	2200	0,8211	0,8976			
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	20,0	600							
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	15,0	280							
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	130					42,0	0,007	7,0
7	Jäme kerge saviliiv	43,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,3						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul Mpa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			19,5%	384,44	316,41	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	4,0					384,44		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					341,84		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	7,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			6,5%	285,80		
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	20,0					227,04		
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	15,0					122,82		
6	Kruusliiv ja jämeliiv	30,0	Nihkepinged	0,0041	0,0151	71,0%	84,74		
7	Jäme kerge saviliiv	43,0	Nihkepinged	-0,0023	0,0046	148,6%	50,84		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0045	0,0046	-0,1%			0,798
	Katendi kogupaksus	124,0					Parandustegur Δ		0,034

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 3000

Koormussagedus: 5293 normtelge ööp/raja

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve kattele: 0,6 MPa

Normhällbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: esimene katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbe-pinged R_{max}	Lubata-vad tõmbe-pinged R_{lub}	Sise-hõõrde-nurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	1400	800	2200	0,8524	0,9144			
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	46,0	280							
5	Kruusliiv ja jämeliiv	32,0	130					42,0	0,007	7,0
6	Jäme kerge saviliiv	30,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,4						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus-moodul Mpa	Vajalik elastsus-moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			6,3%	338,96	313,02	
1	Killustikmastikasfalt - SMA	4,0					338,96		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					296,22		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	8,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			4,8%	248,28		
4	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	46,0					183,00		
5	Kruusliiv ja jämeliiv	32,0	Nihkepinged	0,0016	0,0156	87,8%	83,49		
6	Jäme kerge saviliiv	30,0	Nihkepinged	-0,0038	0,0048	176,7%	47,42		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0047	0,0048	0,7%			0,797
	Katendi kogupaksus	125,0					Parandustegur Δ		0,034

KATENDI ARVUTUS

Betoontee asfalt 3000

Koormussagedus: 7129 normtelge ööp/rajae

Pinnas: tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne k

Maantee klass: 1

Tugevustegur: 1,00

Niiskuspakkond: 2, niiske

Ratta jälje läbimõõt: 37 cm

Teekatendi liik: Püsikatend

Töökindlustegur: 0,95

Summaarne parandus suhtelisele niiskusele: -0,05

Erisurve katte: 0,6 MPa

Normhõlbetegur 1,71

L1.T3 p1; -0,05=-0,05

Koormus: Dünaamiline, 0,85 paarisrata

Lisainfo: teine katend

Alumise asfaltkihi mat. tegur: 0,9

ARVUTUSE KÄIK

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus	Kihi elast-susmoodul E_{ekv} arvutamiseks	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks nihkele	Kihi elast-susmoodul arvutamiseks paindele	Arvutatud tõmbepinged R_{max}	Lubata-vad tõmbepinged R_{lub}	Sise-hõõrdenurk	Nidusus	Kihtide seotistegur K_3
		cm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Kraad	C	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	4,0	3200	1800	4500					
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0	2400	1200	3600					
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	10,0	1400	800	2200	0,6412	0,8718			
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	20,0	600							
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	24,0	280							
6	Kruusliiv ja jämeliiv	32,0	130					42,0	0,007	7,0
7	Jäme kerge saviliiv	30,0	65					40,0	0,005	3,0
ALUS	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolmne kerge liiv	32,4						13,1	0,010	1,5

ARVUTUSE TULEMUSED

Kihi nr.	Kihi nimetus	Kihi paksus cm	Tugevuse näitaja				Üldine elastsus- moodul MPa	Vajalik elastsus- moodul MPa	Arvutuslik niiskus W1 või Warv
			Kriteerium	Nihkepinged MPa		Varu %			
				t _{arv}	t _{lub}				
			Üldine elastsusmoodul			43,0%	466,53	321,76	
1	Killustikmastiksfalt - SMA	4,0					466,53		
2	Tihe kuum asfaltbetoon - ACsurf; ACbin	5,0					412,09		
3	Kuum poorne asfaltbetoon - ACbase	10,0	Asfaltbetooni tõmbepinged			24,5%	352,09		
4	Kompleksstabi kiht asfaldipurust teel sega	20,0					252,65		
5	Optimaalse terastikuga killustiksegu (gran	24,0					144,95		
6	Kruusliiv ja jämeliiv	32,0	Nihkepinged	0,0008	0,0143	92,3%	83,49		
7	Jäme kerge saviliiv	30,0	Nihkepinged	-0,0041	0,0044	191,1%	47,42		
	tolmne saviliiv, raske tolmne saviliiv, tolm		Nihkepinged aluspinnasel	0,0043	0,0044	0,3%			0,797
	Katendi kogupaksus	125,0					Parandustegur Δ		0,034

LISA 4

TASUVUSARVUTUSES KASUTATUD LÄHTEANDMED

	Tüüp BET	Tüüp AB+BET	Tüüp AB	Allikas, märkused
Katendikonstruktsiooni, 2+2, ehitusmaksumus, EUR/km	1 560 060	1 593 912	912 040	Arvutuslik
Investeeringu jääkväärtus, 40 aasta pärast, %	-25%	-25%	0%	25% - kokkuleppel Tellijaga
Ehitusaegsed liikluspiirangud, 1km lõik, päevad	60	60	30	Eksperthinnang
Ehitusaegsete liikluspiirangute kulud, EUR	63000	63000	31500	Keskmine liiklejate ajakulu auto kohta 2,8 EUR/h, eeldus et AKÖL on 15000 ja keskmine kiiruse langus ehituslõigul on 40 km/h
Liikluspiirangute kulud perioodilise hoolde ajal, EUR	15750	7875	7875	Eksperthinnang: 1/4 ehitusaegsetest liikluspiirangute kuludest. Tüüp AB+BET kulud samad mis tüüp AB, kuna tegemist on sama tööga.
1 km AB kulumiskihi maksumus, 2+2, EUR/km		216952	216952	9EUR/m ² KMA 4cm, 0,4 EUR/m ² freesimine
AB kulumiskihi taastamise intervall, aasta	-	5	5	Eksperthinnang
AB katendi taastusremont pärast 20 aastat, 2+2, EUR/km			598 845	Arvutuslik
Betoonkihi teemantfreesimise maksumus 2+2 tee, EUR/km	382666	-	-	60SEK/m ² =6,88EUR, (Dahlin&Eliasson 2007), 12AUD/m ² =8,29EUR (Arvo Tinni, 2013)
Betoonkihi teemantfreesimise sagedus, aasta	12-10-10	-	-	Eksperthinnang, teemantfreesimine 3 korda eluea jooksu
Kattemärgistuse liik ja kestus, aastat	Värv, 2 aastat	Plastik, 5 aastat	Plastik, 5 aastat	Allikas: Eksperthinnang, plastik iga kulumiskihi asendamise järel AB puhul
Kattemärgistuse maksumus, EUR/m ²	3,51	11,8	11,8	0,35 m ² /m üks niit 1+1, Betoon - värv, AB - plastik.
Kattemärgistuse maksumus, EUR/km	2457	8260	8260	Arvutuslik
Teepinna valgustuse maksumus aastas, EUR/km	1050	1500	1500	Ühikhinna allikas: Maanteeamet Betoonkatte puhul on võimalik vähendada valgustuse kulusid kuni 30%.
Kulumiskihi taastamise intervall naastrehvide keelustamise korral, aasta	-	10	7	Eksperthinnang