



Terastorusillad

Projekteerimisjuhend

Terastorusillad

Projekteerimisjuhend v 1.04 (31.12.2009)

Projekteerimisetapi juhtimine

Maanteeamet

Helsingi 2008

Kaanefoto: Sillaregister

ISBN 978-951-803-935-1
TIEH 2100054-07

Vörguväljaande PDF (www.tiehallinto.fi/sillat)

ISBN 987-951-803-934-4
TIEH 2100054-v-07

Edita Prima Oy
Helsingi 2008

Väljaanne müügis/saadaval
Edita (asiakaspalvelu.prima@edita.fi)
Faks (+358) 020 450 2470
Telefon (+358) 020 450 011

MAANTEEMET
Keskadministratsioon
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Telefon 0204 22 11

VASTUVÖTJA

Teedeosakond

Konsultandid

SEADUSLIK ALUS

Maanteeeadus § 109

Asendab

Gofreeritud terastorud (TIEL 2172501, 1997)

KOHALDUVUS

Maanteeamet

Kehtib

1.11.2008 – AJUTISELT

MÄRKSÖNAD

Juhised, sillaprojekteerimine, torusillad

Terastorusillad, projekteerimisjuhend, TIEH 2100054-v-07

See juhend asendab varasema juhendi „Gofreeritud terastorud”. Juhendi uuendamise vajadus on tekkinud mõõdistamismeetodite ja hanketavade arenemise tõttu.

Väljaanne on koostatud Maanteeameti, Raudteehalduse keskuse, Kaitos Oy, Rumtec Oy ja Oy ViaPipe Ab koostöös. Konsultandiks oli Destia Konsulttipalvelut.

Terastorusildade juhend on jagatud kolmeks osaks:

projekteerimisjuhend	TIEH 2100054-v-07
ehitamise kvaliteedinõuded	TIEH 2200050-v-07
parandusjuhend	SILKO 2.341

Projekteerimisjuhend sisaldab torusildade toimivusnõudeid, uuendatud projekteerimisaluseid ja projekteerimisjuhiseid.

Üksuse juht
Tehnilised teenused



Matti Piispanen

Arendusjuht
Sillatehnika, projekteerimine



Olli Niskanen

LISAINFO

Markku Nousiainen

Maanteeamet, eksperditeenused

Tel (+358) 0204 22 2386

SISSEJUHATUS

Väljaanne „Gofreeritud terastorud“ aastast 1997 käsitleb gofreeritud terastorude mõõtmevahemikku 2–5 m ja selles on antud juhised projekteerimiseks, ehitamiseks ja korrashoiuks. Dokumendi uuendamist alustades otsustati dokument jagada kolmeks eraldi väljaandeks: projekteerimisjuhend, ehitamise kvaliteedinõuded ja parandusjuhend. Parandusjuhend on koostatud Sildade parandusjuhiste tööpõhiste kvaliteedinõuetena.

Uus dokument sisaldab üldisi kvaliteedinõudeid ja juhiseid gofreeritud terastorusildade projekteerimiseks. Olulisemad projekteerimist puudutavad muudatused võrreldes eelmise väljaandega on mõõdistamisjuhiste uuendamine ja kvaliteedinõuete täpsustamine.

Selle dokumendi koostamist juhtis eksperdirühm, mille esimees oli Maanteeameti eksperditeenuste teeinsener Markku Nousiainen. Töörühma liikmed olid

- arendusjuht Olli Niskanen, Maanteeamet, eksperditeenused
- arendusjuht Jouko Lämsä, Maanteeamet, eksperditeenused
- geospetsialist Pentti Salo, Maanteeamet, eksperditeenused
- diplomiinsener Ilkka Sinisalo, Oy VR-rata Ab (RHK esindajana)
- tootejuht Pauli Kukkonen, Oy ViaPipe Ab
- tegevdirektor Peter Brandt, Oy ViaPipe Ab
- osakonnajuhataja Jouko Selkämaa, Rumtec Oy
- tegevdirektor Olli Böök, Kaitos Oy
- tootejuht Perttu Juntunen, Kaitos Oy

Dokument on koostatud firmas Destia Konsulttipalvelut, kus töös osalesid tehnikadoktor Torsten Lunabba, diplomiinsener Antti Rämetsä, diplomiinsener Panu Tolla ja diplomiinsener Antti Jussila.

Helsingis, oktoobris 2008

Maanteeamet
Sillatehnika

Sisukord

1	ÜLDIST	9
1.1	Juhendi eesmärk ja rakendusala	9
1.2	Definitsioonid	9
2	TOIMIVUSNÕUDED	10
2.1	Välimus ja sobivus keskkonda	10
2.2	Liiklus ja vee liikumine	10
2.3	Konstruksiooni kandvus	10
2.4	Konstruksiooni kasutusaeg	10
3	PROJEKTEERIMISE ALUSED	11
3.1	Terastoru tüübid	11
3.1.1	Toru kuju	11
3.1.2	Toru konstruktsioon	14
3.2	Toru valimine	14
3.2.1	Kasutusotstarve	14
3.2.2	Hüdrauliline mõõdistamine	15
3.2.3	Aluspinna tingimused	15
3.3	Konstruksiooni kandvusnõuded	16
3.4	Materjalinõuded	16
3.4.1	Betoon	16
3.4.2	Lehtmaterjal ja kruvid	16
3.4.3	Metallpinded	16
3.4.4	Mitte metallpinded	18
3.5	Keskkonnahoiu aspektid	18
4	PROJEKTEERIMINE	19
4.1	Konstruksiooniline mõõdistamine	19
4.1.1	Torule mõjuvad koormused	19
4.1.2	Jõusuuruste arvutamine	23
4.1.3	Mõõdistamine	25
4.1.4	Konstruksiooni stabiilsus	30
4.1.5	Lubatud hälbed	32
4.2	Kasutusaja mõõtmine	32
4.2.1	Üldist	32
4.2.2	Vee kvaliteedi mõju	32
4.2.3	Tingimusklassid	33
4.2.4	Terastoru kasutusaega mõjutavad tegurid	34
4.2.5	Lisakaitse	35
4.2.6	Kasutusaja lihtsustatud mõõtmine	36
4.3	Toru kalle ja suunanurk	38

4.4	Toru pikkus	39
4.5	Kõrvutised torud	40
4.6	Vundamentimine	41
4.6.1	Üldist	41
4.6.2	Silla läbipaine	42
4.6.3	Vundamentimisviisid	44
4.7	Terastoruga seonduvad muud konstruktsioonid ja tarvikud	45
4.7.1	Siirdekiil	45
4.7.2	Vooderdus	45
4.7.3	Tugimüürid	45
4.7.4	Kuivatamine	45
4.7.5	Valgustusseadmed ja kinnitid	45
4.7.6	Kontrolltapid	46
4.7.7	Liiklustunneli otsa kaitse	46
4.7.8	Piirded	47
5	VIITED	48

6	LISAD	50
---	-------	----

LISA A. Gofreeritud terastorude põhiandmed

LISA B. Vundamentimisviiside suunavad mudeljoonised

LISA C. Mõõdistusnäide

1 ÜLDIST

1.1 Juhendi eesmärk ja rakendusala

Gofreeritud terastorusid kasutatakse tee-ehitusel sildade ja truupidena. Raudteesillana võib gofreeritud terastoru kasutada ainult Raudteehalduse keskuse väljastatud, projekteerimisalustesse märgitud hankekohase loaga.

Selles dokumendis antakse juhised ja üldised kvaliteedinõuded jõesildade ja liiklustunnelitena kasutatavate, vähemalt 2-meetrise vaba avaga gofreeritud terastorude projekteerimiseks. Raudteesillana toimiva gofreeritud terastoru vaba ava tohib olla maksimaalselt 8 meetrit.

Terastorusilla ehitamise tarvis tuleb alati teha mõõdistusarvutused ja koostada ehitusprojekt. Arvutused koos ehitusprojektiga toimetatakse tellijale.

1.2 Definitsioonid

Gofreeritud terastoru

Jõesillana ja liiklustunnelina kasutatav torukonstruksioon, mis on valmistatud gofreeritud teraslehest või teraslindist.

Gofreering

Teraslehe või -lindi laineline kuju. Gofreering märgitakse profiili laine pikkuse ja kõrgusena.

Keerdõmblusega toru

Torukonstruksioon, mis on valmistatud teraslindist kas valtsides või keevitades.

Mitmekihiline lehtkonstruktsioon

Torukonstruksioon, mis koosneb mitmest kihist gofreeritud teraslehtedest.

Kattesügavus

Toru lae väikseim vertikaalne kaugus teepinnast või raudtee kõrgusjoonest.

Toru läbimõõt

Ümara toru siseläbimõõt (d).

Toru laius ja kõrgus

Toru maksimaalne siselaius (b) ja -kõrgus (h).

Suunanurk

Kanali keskjoone ja toru keskjoone vaheline nurk, mõõdetuna päripäeva kanalite keskjoonest.

Kalle

Toruotsa kaldus osa, mis on sageli teenõlva kaldes.

2 TOIMIVUSNÕUDED

2.1 Välimus ja sobivus keskkonda

Terastorusilla sobivust tuleb hinnata silla asukoha põhiselt ja projekteerimise lähtekohaks tuleb määratleda keskkonda sobivusest lähtuvad nõuded ava suurusele ja kujule, konstruktsioonitüübile, pinnatöötlusele ja toruotste vooderdusele.

2.2 Liiklus ja vee liikumine

Konstruktsioon peab vastama kehtestatud avanõuetele ja võimaldama veel takistuseta läbi toru voolata. Avanõuete kohta tuleb projekteerimise lähteandmeteks hankida kohaliku keskkonnaameti hinnang.

2.3 Konstruktsiooni kandvus

Konstruktsioon kui tervik, võttes arvesse vundamentimist ja ümbrusetäidet, peab taluma teesildade puhul Maanteeameti ja raudteesildade puhul Raudteehalduse keskuse juhistes eeldatava kindlusega projektikoormusele vastavat liikluskoormust ja muud konstruktsioonile mõjuvat koormust.

2.4 Konstruktsiooni kasutusaeg

Maanteeameti sildade korrashoiupoliitika kohaselt on terastorusilla normaalne kavandatav kasutusaeg 50 aastat. Raudteehalduse keskuse sildade korrashoiupoliitika kohaselt on terastorusilla normaalne kavandatav kasutusaeg 100 aastat.

Kavandatud kasutusaja saavutamise eelduseks on silla põhikonstruktsiooni kandvate osade kvaliteedinõuete kohane ehitamine ning hea hoolduse ja korrashoiuga tagatud vastupidavus. Muid konstruktsiooniosi võib parandada ja välja vahetada isegi mitu korda.

Iga konkreetse silla konstruktsioonile võib seada soovitud siht-kasutusaja, mis lisaks tingimusklassile mõjutab toru kaitsemeetodi määramist. Normaalsest kavandatavast kasutusajast erinev siht-kasutusaeg tuleb projektis alati ära märkida.

Kui siht-kasutusaega ei ole kasutusaja mõõtmiste põhjal võimalik saavutada, tuleb ava mõõtmetele lisada 200 mm, et vajaduse korral oleks tulevikus parandusmeetodina võimalik kasutada keermestusmeetodit.

3 PROJEKTEERIMISE ALUSED

3.1 Terastoru tüübid

3.1.1 Toru kuju

Gofreeritud terastorud jagatakse kuju järgi järgmisteks rühmadeks:

- ümar
- madala konstruktsiooniga
- liiklustunneli tüüp
- elliptiline ja horisontaalelliptiline
- terasvõlv.

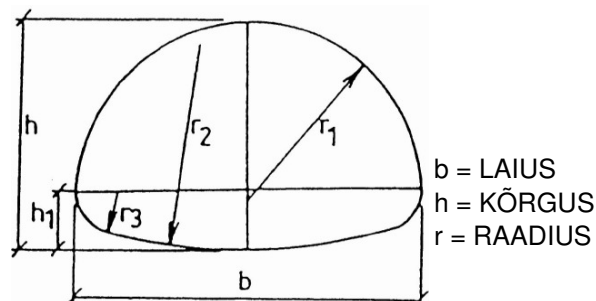
Mainitud torutüüpe kasutatakse nii jõesildadena kui ka liiklustunnelitena. Toru kuju tuleb kaaluda iga juhtumi korral eraldi, võttes arvesse kohalikke asjaolusid ja eriaspekte. Terasvõlv loetakse erinevale konstruktsioonile vaatamata torusillaks.

Ümar toru sobib raudteesildadeks, jõesildadeks ning tervisesporti ja põllumajandust teenindavateks liiklustunneliteks.

Madala konstruktsiooniga toru sobib liiklustunneliteks ning madala tammi all olevateks jõesildadeks. Madala konstruktsiooniga toru võib teatud veesügavuse korral juhtida isegi 50% rohkem vett kui samale sügavusele paigutatud sama kõrge ümar toru.

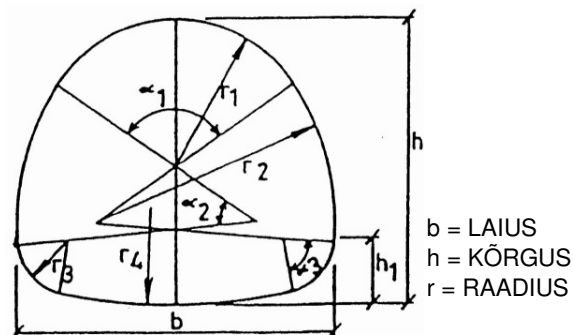
Madala konstruktsiooniga toru kasutamist piirab toru alanurkade juurde tekkiv suur põhjakoormus, mis seab erilisi nõudmisi aluspinnase kandvusele. Madala konstruktsiooniga toru asemel võib kasutada näiteks kõrvuti asetsevaid ümaraid torusid.

Madala konstruktsiooniga torusid on mitut tüüpi, erineva alanurga kõverusraadiusega.



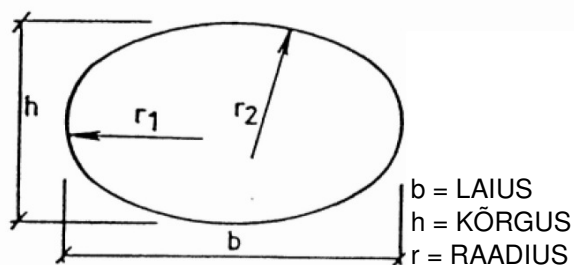
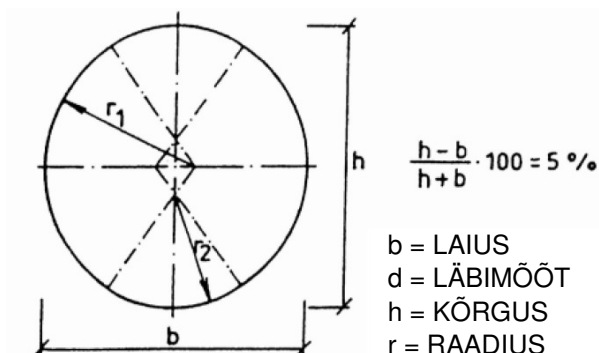
Joonis 1. Madala konstruktsiooniga toru ristlõige.

Liiklustunneli tüüpi kasutatakse, nagu nimest järeldub, peamiselt liiklustunnelina. Kui vaja on suurt tunnelikõrgust, siis võib valida liiklustunneli tüüpi või elliptilise kujuga toru vahel.



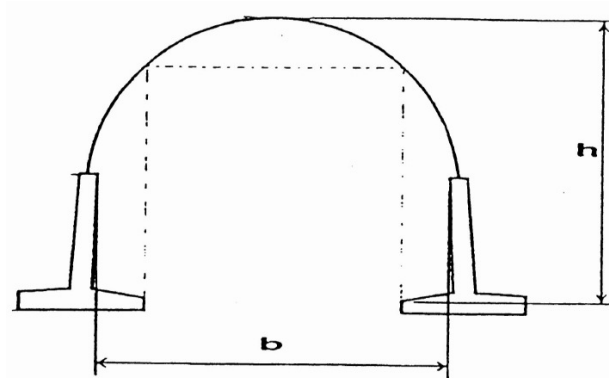
Joonis 2. Liiklustunneli tüüpi toru ristlõige.

Elliptiline toru (elliptilisus püstsuunas 5%) on alternatiivne konstruktsioon ümarale torule või liiklustunneli tüübile. **Horisontaalelliptiline** toru (elliptilisus horisontaalsuunas 15%) sobib kasutamiseks madala konstruktsiooniga toru alternatiivina.



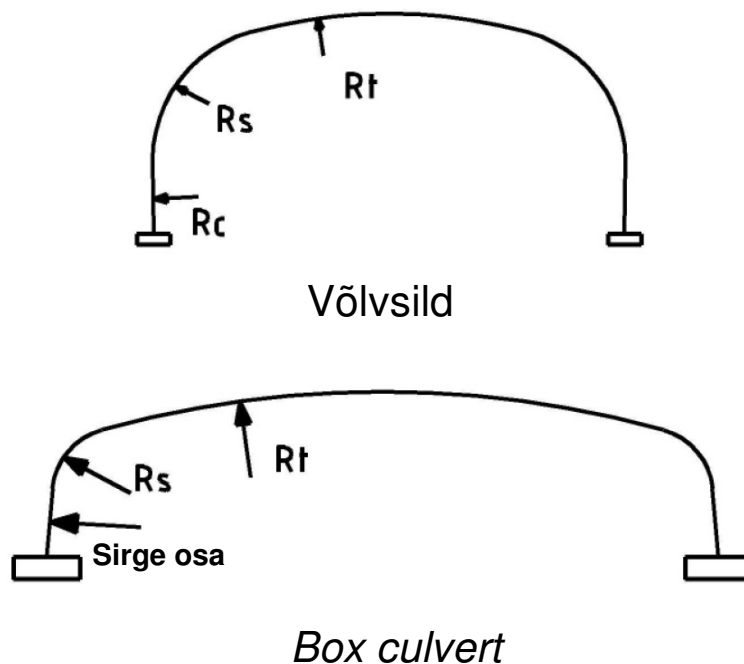
Joonis 3. Elliptilise ja horisontaalelliptilise toru ristlõige.

Terasvõlv on konstruktsioon, millel on eraldi vundament, enamasti terasbetoontaldmikud. Selle peamised kasutusobjektid on kandvale aluspinnasele ehitatavad liiklustunnelid, jalakäijatunnelid ja jõesillad. Jõesilla kanal jääb sel juhul pinnasalusele.



Joonis 4. Terasvõlvi ristlõige.

Lisaks eelmainitud terastoru- ja terasvõlvsilla tüüpidele on Rootsi mõõdistusjuhendis /7/ kirjeldatud kahte muud tüüpi, milleks on **võlvsild** ja **ristkülikulise kanaliga sild** (*box culvert*). Võlvsild moodustub kolmest erinevast kaareosast ja sobib hästi liiklustunneliks. Rõngasavaga *box culvert* -sild on võlvsillale sarnaselt liiklustunneli laadi sild, kuid sobib ka ristmikusillaks. See juhend käsitleb ka selliste sildade projekteerimist, ehkki Soomes on neid sillatüüpe siiani heaks kiidetud üksnes hankepõhiselt.



Joonis 5. Võlvsild ja box culvert -sild /7/.

3.1.2 Toru konstruktsioon

Gofreeritud terastorud jagatakse konstruktsiooni järgi järgmisteks rühmadeks:

- mitmekihiline lehtkonstruktsioon
- keerdõmblusega toru
- terasvõlv.

3.2 Toru valimine

Toru suuruse, kuju ja konstruktsioonitüübi valik tehakse ehituskoha tingimuste ja konstruktsioonilise mõõdistamise põhjal, eri võimalusi võrreldes. Võrdluses võetakse arvesse mh järgmisi tegureid:

- kasutusotstarve
- välimus
- hüdrauliline mõõdistamine
- tammi kõrgus
- aluspinnase tingimused
- vee ja pinnase kvaliteet
- kulud.

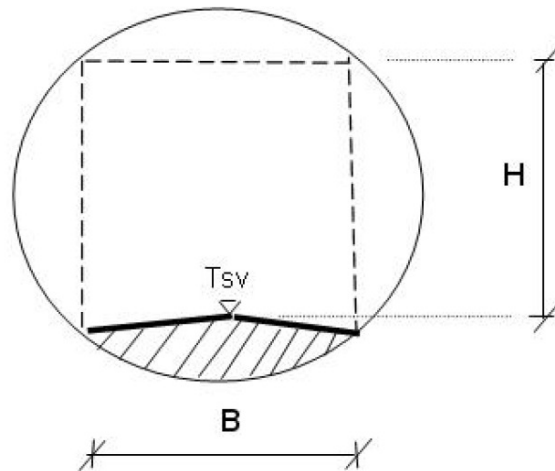
3.2.1 Kasutusotstarve

Jõesilla tüüp valitakse eelkõige nõutava avasuuruse ja korrashoiuaspektide põhjal. Kasutusotstarbe seisukohalt on tüübi valikut mõjutav tegur paadiliiklus.

Liiklustunneli tüübi valikut mõjutavad kasutusotstarve seisukohalt sellised tegurid nagu kergliiklus, põllumajandus ja tervisesport. Ava suurus mõõdistatakse alt läbi kulgeva liikluse ja korrashoiuvahenditeks vajaliku ruumi järgi.

Liiklusele vajaliku ava mõõtmed määratakse üldiselt tee ehitusprojektis. Kui ava kohta ei ole nõudeid märgitud, siis liiklustunneli ristkülikukujulise vaba liiklusruumi laiuse ja kõrguse minimaalmõõtmed on (joonis 6):

- Mehhaniseeritult korras hoiatavatel liiklustunnelitel
 - laius $B \geq 3,5$ m
 - kõrgus $H \geq 3,0$ m.
- Loodusradadel ja loomade liikumisteks ehitatavatel tunnelitel, mida ei hoita korras mehhaniseeritult
 - laius $B \geq 2,0$ m
 - kõrgus $H \geq 2,5$ m.



Joonis 6. Liiklustunneli vaba liiklusruumi minimaalmõõtmed.

Kui terastorusild toimib ristmikusillana, tuleb vaba liiklusruumi kõrgusele lisada 0,5 meetrine kokkupõrkeohu varu.

Silla ehitusprojektis tuleb alati märkida nõutavad liiklustehnilised mõõtmed, millest väiksemaid ei tohi ehitustöödel kasutada.

3.2.2 Hüdrauliline mõõdistamine

Jõesilla avasuuruse nõue määratakse enamasti piirkondliku keskkonnaameti hinnangus ning sel juhul ei ole vaja teha hüdraulilist mõõdistamist. Vajaduse korral võib veeava suuruse ja torupõhja paigutuskõrguse määramiseks teha hüdraulilise mõõdistamise Maanteeameti väljaande „Teede projekteerimine IV. Kuivatamine” osa 4.46 järgi /1/.

Toru ava suurust ja kuju määrates võetakse alternatiividena arvesse erikujulisi eraldi torusid ning ka võimalust kasutada paralleelselt kahte või enam toru. Kahe või ka enama toru kasutamine võib kõne alla tulla juhul, kui vooluhulk on suur ja kasutamiseks on vähe kõrgust. Torud võivad olla ka eri suurusega.

3.2.3 Aluspinna tingimused

Silla aluspinna tingimused selgitatakse välja Maanteeameti juhendis „Silla geotehnilised projekteerimisalused” /2/ antud nõuete kohaselt. Pinnaseuuringute osana selgitatakse välja aluspinnase ja vee korrosioonitingimused.

Vahelduvate tingimustega aluspinnase korral on enamasti otstarbekas selgitada välja aluspinna tingimused sillakoha piirkonnas sellises ulatuses, et silla saaks paigutada võimalikult soodsasse kohta.

3.3 Konstruktsiooni kandvusnõuded

Teel olev konstruktsioon peab taluma Maanteeameti projekteerimisjuhendis „Sildade koormus” /3/ ja raudteel olev konstruktsioon peab taluma Raudteehalduse keskuse projekteerimisjuhendis „Raudteesildade projekteerimisjuhised” /4/ määratletud projektkoormust juhendis mainitud stabiilsuspõhjustel. Konstruktsioonil ja selle vundamendil peab olema piisav purunemiskindlus, võttes arvesse erinevaid purunemisiise, ning nende kuju ei tohi kahjulikul viisil deformeeruda.

Maanteeameti juhendi „Silla geotehnilised projekteerimisalused” /2/ järgi määrab silla projekteerija silla lubatud läbipainde ja läbipainde erinevuse. Silla vundamentimine kavandatakse nii, et see nõue on täidetud. Konstruktsiooni mõõdistamine tehakse peatükis 4 kirjeldatud meetoditega.

3.4 Materjalinõuded

3.4.1 Betoon

Terasvõlvi taldmikes kasutatakse vastupidavuse tagamiseks sillabetooni, mille tugevusklass ja külmataluvusnõue määratakse „Betoonkonstruktsioonide juhiste” /5/ järgi, võttes arvesse silla siht-kasutusaega.

3.4.2 Lehtmaterjal ja kruvid

Mitmekihilise lehtkonstruktsiooni lehtmaterjal peab vastama standardi SFS-EN 10024 „Kuumvaltsitud konstruktsiooniterased” klassi S235 JR nõuetele.

Keerdõmblusega konstruktsiooni lehtmaterjal peab vastama standardi SFS-EN 10326 „Pideval kuumsukelmeetodil pinnatud lehtmaterjal-konstruktsiooniterased. Tehnilised tarnetingimused” või standardi SFS-EN 10327 „Pideval kuumsukelmeetodil pinnatud vormitavad lehtmaterjaliterased. Tehnilised tarnetingimused” nõuetele.

Kruvide voolavuspiir (R_{eL}) peab olema vähemalt 320 MPa. Kruvitüübil peab olema toru tarnija heakskiit.

3.4.3 Metallpind

Mitmekihilise lehtkonstruktsiooni kuumtsinkpinne peab vastama standardi SFS-EN ISO 1461 „Müügitoote teras- ja malmtoote kuumtsinkpind. Liigitus ja katsemeetodid” nõuetele. Standardis määratletakse keskmine kihipaksus ja lokaalne minimaalpaksus. Miinimumnõuded tsingikihi paksusele on tabelis 1.

Tabel 1. Mitmekihilise lehtkonstruktsiooni kuumtsinkpinde minimaalpaksuse nõuded.

Terase paksus (t)	Keskmine kihipaksus (min) [μm]	Lokaalne kihipaksus (min) [μm]
$t \geq 6 \text{ mm}$	85	70
$3 \leq t < 6 \text{ mm}$	70	55
$1,5 \leq t < 3 \text{ mm}$	55	45

Keerdõmblusega konstruktsiooni kuumtsinkpinne peab vastama standardi SFS-EN 10326 „Pideval kuumsukelmeetodil pinnatud lehtmetallkonstruktsiooniterased. Tehnilised tarnetingimused” või standardi SFS-EN 10327 „Pideval kuumsukelmeetodil pinnatud vormitavad lehtmetallterased. Tehnilised tarnetingimused” nõuetele. Standardid kehtivad nii tsink- kui alumiiniumtsinktoodetele.

Standardites on pinde mass määratletud mõlema poole kokkuliidetud väärtusena. Massi põhjal on tabelisse 2 arvatud pinde paksuse keskmine väärtus ja ühe mõõteala minimaalväärtus.

Tabel 2. Keerdõmblusega konstruktsiooni tsinkpinde paksuse määramine.

Tsinkpinne	Mass [g/m^2] (mõlemad pooled kokku)		Paksus [μm]	
	Kolme katse keskmine väärtus	Ühe katse väärtus	Mõlema poole keskmine väärtus	Ühe mõõteala minimaalväärtus
Kuumtsinkpinne Z600	600	510	42	32
Kuumtsinkpinne Z840	840	714	60	46
Kuumtsinkpinne Z1000	1000	850	70	53
Kuumtsinkpinne Z1200	1200	1020	85	65

Pinded Z1000 ja Z1200 ei kuulu veel eelmainitud pideva kuumsukelmeetodi standarditesse. Nende kontrollimine toimub müügitoodete standardi SFS-EN ISO 1461 kohaselt.

Tsinkpinde paksus ja lisakaitse vajadus määratakse kasutusaja mõõtmisel.

Kruvid ja mutrid peavad olema kuumtsingitud ja tsingikihi paksus peab olema 45 µm. Kruvi lõtk tuleb valida nii, et kruvi tsingikiht ei saa pingutamisel viga.

3.4.4 Mittemetallpinded

Mittemetallpinded on värvid ja polümeerpinded nagu epoksü, polüuretaan ja polüeteen. Need pinded on tsingitud teraspinde lisakaitsemeetodid.

Mittemetallpinnete korral järgitakse järgmisi standardeid:

- SFS-EN ISO 12944-1... 8 *Värvid ja lakid. Teraskonstruksioonide korrosioonitõrje värvkattesüsteemidega.*
- SFS-EN ISO 10169-1. *Orgaanilise ainega kaetud (plastpinnatud) lehtterastooted. Osa 1: Üldandmed (määratlused, materjalid, hálbed, katsemeetodid).*
- ASTM A742M *Specification for Steel Sheet, Metallic-coated, and Polymer Precoated for Corrugated Steel Pipe.*

3.5 Keskkonnahoiu aspektid

Selle juhendi kohaselt projekteeritud terastorusillad ei põhjusta konstruktsioonidest tulenevat keskkonnakahju. Pinnatöötlus tuleb teha värvimistöokoja tingimustes ning tsinkpinne ja lisakaitseks kasutatavad värvid ja muud pinded kuluvad nii aeglaselt ja väikeste kogustena, et need ei ohusta keskkonda.

4 PROJEKTEERIMINE

4.1 Konstruksiooniline mõõdistamine

4.1.1 Torule mõjuvad koormused

Projektkoormused vastavad Maanteeameti või Raudteehalduse keskuse kehtivatele projekteerimisjuhenditele /3, 4 ja 6/.

Pinnase kaal

Torule mõjuvast ümbrusetäitest ja konstruksioonikihtidest tekkiv vertikaalne koormus määratakse valemiga

$$p_m = \gamma * h_c, \text{ milles} \quad (1)$$

γ = pinnase mahukaal [kN/m³]

h_c = kattesügavus [m] (vertikaalne kaugus aluspinnasest toru pinnani).

Arvutustes tuleb teoreetiline kattesügavus h_c asendada Rootsi mõõdistamisjuhendi kohase redutseeritud kõrgusega $h_{c,red}$, mis on toru tegelik kattesügavus, kui arvesse on võetud täitetööde järgset tõusu.

Pinnase mahukaaluna kasutatakse tabeli 5 kohaseid väärtusi, olenemata põhjaveepinna tasemest.

Kattesügavuse minimaalväärtus on teesildadel 500 mm. Raudteesildadel on kattesügavuse minimaalväärtus raudtee kõrgusjoonest (kv) mõõdetuna 1400 mm.

Liikluskoormus

Torusildade kandvusarvutustes arvutatakse liikluskoormuse jaotumine aluspinnal ja koormuste mõju toruprofiilile olenevalt kasutatavast meetodist. Kui kandvusarvutus tehakse Rootsi mõõdistamisjuhendi /7/ järgi, arvutatakse koormuse intensiivsus σ_v teljekoormustest sügavusel z Boussinesqi valemiga ja teisendatakse seejärel valemi (2) järgi ekvivalentseks joonkoormuseks sügavusel z .

$$p_{\text{trafik}} = \pi * h_c * \sigma_v / 2 \quad (2)$$

Ekvivalentne joonkoormus ei kirjelda tegelikku liikluskoormust, vaid see on arvutuslik, teega risti olev joonkoormus [kN/m], mida kasutatakse torusillale mõjuvate normaaljõudude ja paindemomentide arvutamiseks.

Teljekoormustega samaaegne ühtlane pindkoormus võetakse sellisena arvesse eraldi.

Raudteesildade ekvivalentset liikluskoormust p_{trafik} arvutades kasutatakse kattesügavusena liiprite alumisest pinnast arvutatud kattesügavust.

Muudes arvutustes, nagu näiteks püsiva koormuse mõju ja raudtee liikluskoormuse löögikoefitsiendi arvutamisel kasutatakse tegelikku kattesügavust $h_{c,red}$. Raudteesillad mõõdistatakse suurimale paindemomendile ja vastavale normaaljõule ning eraldi suurimale normaaljõule ja vastavale paindemomendile, rakendades järgmisi arvutusreegleid:

1. Suurim paindemoment:

Koormuseks on koormusskeemi LM71-35 teljekoormused koos löögikoefitsientidega. Pinnasesurve σ_v arvutatakse teljekoormuste keskpunktist. Kui rööpapaare on mitu, arvutatakse pinnasesurve σ_v määrava rööpapaari teljekoormuste keskpunktist.

2. Suurim normaaljõud:

Sild mõõdistatakse koormusskeemi LM71-35 järgi koos löögikoefitsientidega.

Koormusskeemi ribakoormuse võib asendada ühtlase pindkoormusega (joonis 8), mille suurus on

$$q = 120 \text{ kN/m} / (B + h_r) \quad (3)$$

Koormusskeemi teljekoormused võib asendada ühtlase ekvivalendiga pindkoormusega, mille suurus on

$$q' = 111 \text{ kN/m} / (B + h_r) \quad (4)$$

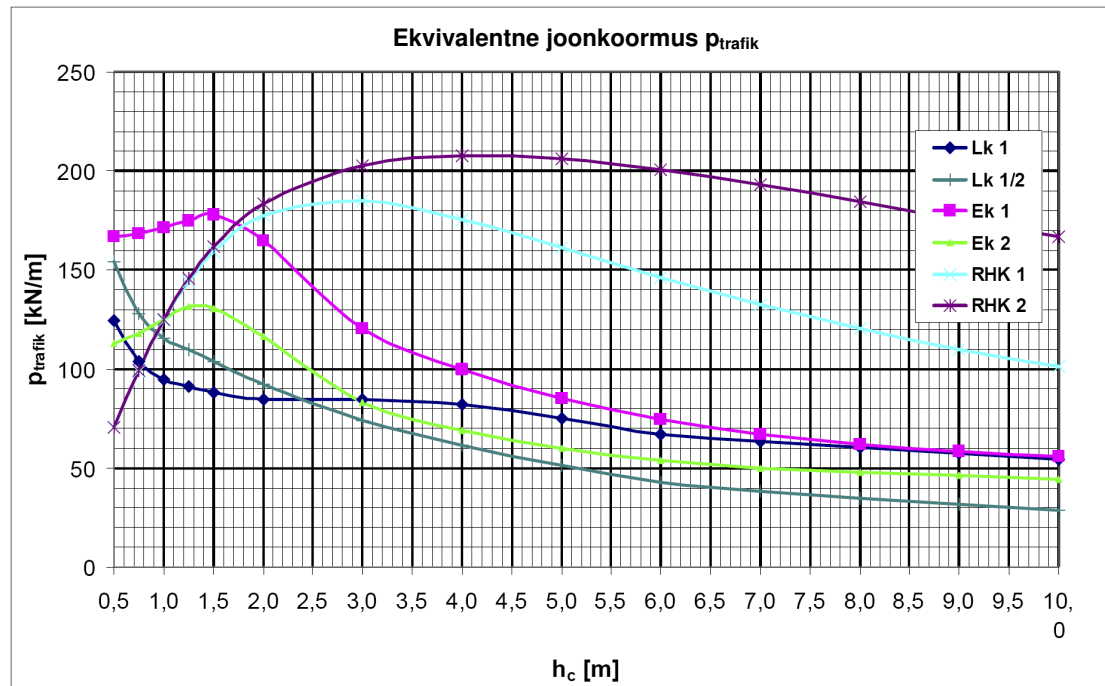
Koormused q ja mõjud q' liidetakse kokku. Kuna pindalakoormus q' mõjutab 6,4 m pikkuses, võib selle mõju arvesse võtta eraldi liikluskoormuse p_{trafik} ekvivalendina samamoodi, nagu teljekoormused punktis 1. Pinnasesurve σ_v' arvutatakse rööpapaari keskkohalt ja selle suurus on

$$\sigma_v' = 0,48 * \sigma_v. \quad (5)$$

Kui rööpapaare on mitu, siis võetakse muude kui määravate rööpapaaride teljekoormused arvesse samamoodi nagu punktis 1. Kui mitme rööpapaari joonisele 8 vastavad koormusalad kattuvad nii, et nende koondmõju suureneb, arvutatakse pinnasesurve q kokkuliidetud väärtuse järgi.

Joonisel 7 on valmis arvutatud ekvivalentne joonkoormus p_{trafik} tavapäraste koormusjuhtumite jaoks, mis on järgmised:

1. Lk1, Maanteeameti koormusjuhendi /3/ kohased Lk1 koormusskeemi 1 teljekoormused (3×210 kN) kahe rajaga.
2. Lk1/2, Maanteeameti koormusjuhendi /3/ kohased Lk1 koormusskeemi 2 teljekoormused (260 kN) kahe rajaga.
3. Ek1, Maanteeameti koormusjuhendi /3/ kohased koormusklassi 1 pöördvankri koormused sama juhendi kohaste löögikoefitsientidega.
4. Ek2, Maanteeameti koormusjuhendi /3/ kohased koormusklassi 2 pöördvankri koormused sama juhendi kohaste löögikoefitsientidega.
5. RHK1, Raudteehalduse keskuse projekteerimisjuhiste RSO /4/ osa 2 kohase koormusskeemi LM71-35 teljekoormused ühelt rööppaariilt ilma löögikoefitsiendita.
6. RHK2, punkti 5 kohane Raudteehalduse keskuse projekteerimisjuhiste kohased teljekoormused kahelt rööppaariilt ilma löögikoefitsiendita. Rööppaaside keskkaukus on 4,5 m.



Joonis 7. Ekvivalentne joonkoormus.

Koormustes Lk1 ja Lk1/2 sisaldub dünaamiline tolerant. Kui kattesügavus on üle 2 meetri, võib dünaamilist koefitsienti vähendada /7/ skeemide (6) kohase kordajaga r_d järgmiselt:

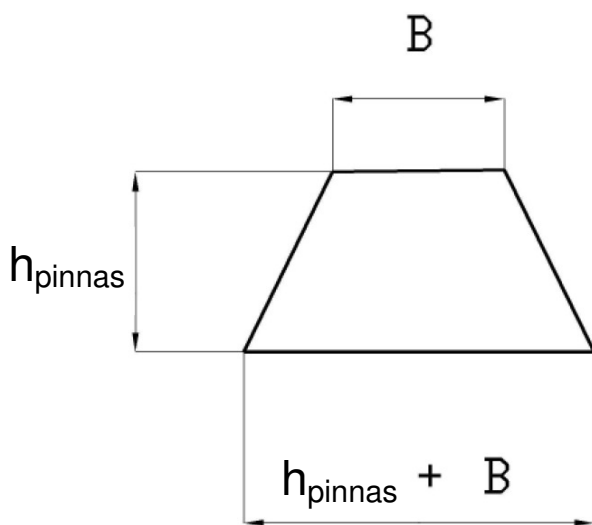
$$\begin{array}{lll}
 r_d = 1 & \text{kui} & h_{c,\text{red}} < 2 \text{ m} \\
 r_d = 1,1 - 0,05 \cdot h_{c,\text{red}} & \text{kui} & 2 \text{ m} \leq h_{c,\text{red}} \leq 6 \text{ m} \\
 r_d = 0,8 & \text{kui} & h_{c,\text{red}} > 6 \text{ m}
 \end{array} \quad (6)$$

Seda vähendust on arvesse võetud Lk1 ja Lk1/2 kõverates joonisel 7. Selliseid vähendusi ei tehta koormustele Ek1 ja Ek2.

Joonisel 7 on koormuste Ek_1 ja Ek_2 löögikoefitsiendid erinevate kattesügavuste korral arvatud Maanteeameti koormusjuhendi /3/ järgi.

Erinevalt liikluskoormustest liidetakse rongikoormuste löögikoefitsient joonisel 7 saadud väärtustele. Löögikoefitsiendi suurus oleneb kattesügavusest h_c ja toru horisontaalmõõtmest D . Rongikoormuse löögikoefitsient ϕ_2 määratakse RSO 2/4/ järgi, kasutades nominaalse sildeava väärtust $L_0 = D$.

Arvutades torusildade kandvust FEM-meetodiga vm viisil, määratakse rattakoormuste jaotumine kõnealuse meetodi kohaselt nii, et rataste koormuspinnad vastavad juhendile „Sildade koormused” /3/. Arvutuste lihtsustamiseks võib FEM-arvutuse teha tasandvariandina. Võib eeldada, et koormuste jagunemise tee põikisuunas vastab joonisele 8.



B = ratta- või tandemkoormuse laius või raudteesildadel liipri laius
($B = 2,6$ m betoonliiprile)

$h_{pinnas} =$ kattesügavus liikluskoormuste juures = h_c

$h_{pinnas} =$ kattesügavus liipri alumisest pinnast rongikoormuste juures

Joonis 8. Ratta- või muu pinnasekoormuse jaotumine tee põikisuunas.

FEM-meetodi kasutamine sildade mõõdistamisel tuleb kõne alla ainult juhtumipõhiselt. Sel juhul tuleb tellijaga kokku leppida mh selles,

- milliste katsetega kontrollitakse arvutusmeetodi sobivust pinnase ja terase koostoimele
- milliseid pinnaseparameetreid ja osavarutegureid tuleb kasutada kasutus- ja piir seisundis
- kas arvutuste ja toimivuse kontrollimiseks tuleb teha sildade proovikoormamist tegeliku kandvuse tõestamiseks
- milliste toru ja pinnase vahelise hõõrdumise väärtustega arvutused tehakse.

4.1.2 Jõusuuruste arvutamine

Rootsi mõõdistamisjuhendit /7/ võidakse rakendada allmainitud muutustele juhul, kui tee pikikalle on maksimaalselt 10%. Mõõdistamisjuhendi kasutamine eeldab ka seda, et täidete ulatus, ristlõigete kõverusraadiuste suhted, konstruktsiooni jäikus jms vastavad sama juhendi nõuetele.

Rootsi juhendi /7/ skeemid on koostatud eelkõige juhtumiks, kus torusild on paigutatud süvendisse. Torusilda võib pidada süvendisse paigutatuks ka siis, kui silla asukohas on tamm eeldusel, et on täidetud mõni nõuetest 1–3:

1. Toru kõrgusest 2/3 paikneb ümbritsevast pinnasest allpool.
2. Tee- või raudteetammi ülaosa laius on vähemalt 2 korda suurem kui toru suurim horisontaalmõõde D.
3. Teetammi nõlvakalle toru juures on vähemalt 1:1,75.

Neil juhtumitel, mil ülalmainitud tingimused ei ole täidetud, ei võeta mõõtmisel arvesse silla peal oleva pinnase võlvmöju ($S_{ar} = 1$, käsiraamat /7/).

Võtmata arvesse liikluskoormusest tekkivat paindemomenti, arvutatakse jõusuurused eraldi pinnase enda kaalu ja liikluskoormuse jaoks Rootsi mõõdistamisjuhendi /7/ järgi.

Täitetöid tehes toru lagipunkt tõuseb ja see vähendab efektiivset kattesügavust, mida tuleb arvutustes arvesse võtta. Lagipunkti tõusu suurus tuleb välja arvutada ja märkida projektijoonistele.

Normaaljõud

Eeldatakse, et normaaljõud mõjub kogu toru übermõõdu ulatuses ühesuurusena.

Pinnase kaalust põhjustatud normaaljõudu arvutades võetakse arvesse pinnase võlvumine toru kohal suurte täitesügavuste korral.

Moment

Liikluskoormuse põhjustatud paindemoment arvutatakse skeemide 7... 10 järgi. Meetod erineb Rootsi juhendis esitatust.

$$M_t = f_4' * f_4'' * f_4''' * f_4^{IV} * D * p_{\text{trafik}} + S_{ar} * (R_t/R_s)^{0,75} * f_1 * f_{2,\text{överf}} * q * D^2 \geq 0 \quad (7)$$

Kordajad f_4'' , f_4^{IV} , D, S_{ar} , f_1 , $f_{2,\text{överf}}$ ja q on samad mis Rootsi juhendis /7/.

Kordaja f_4' väärtus saadakse skeemilt (8) ja kordaja f_4''' väärtus kas jooniselt 9 või skeemilt (9).

$$f_4' = 1 - 0,20 * \log_{10}(\lambda_f) \quad (8)$$

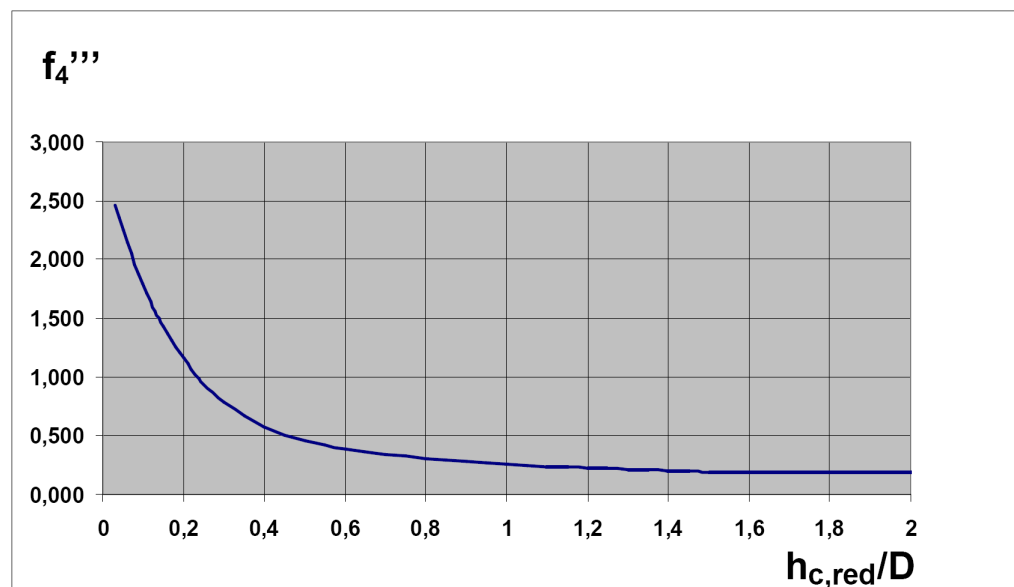
$$f_4''' = (0,3494k^6 - 2,405k^5 + 6,7051k^4 - 9,7382k^3 + 7,8598k^2 - 3,4532k + 0,7502) / 0,265 \quad (9)$$

Skeemis (9) kasutatav muutuja k:

$$k = \min \{ h_{c,red}/D ; 1,5 \} \quad (10)$$

Möödistatav moment toru laes kujuneb välja kolmes etapis:

- Kui täitetöö jõuab toru laeni, siis on tööaegne negatiivne moment toru laes maksimaalne.
- Kui täitetöö on valmis, siis on toru laes täielik püsivatest koormustest tekkiv moment. Moment on väikeste täitesügavuste korral negatiivne, muidu positiivne.
- Kui täitetöö on valmis ja toru koormab liikluskoormus, siis on toru lae moment lõplikult välja kujunenud. See moment on sageli positiivne.



Joonis 9. Kordaja f_4''' .

Torudele, mille raadiuste suhe $R_t/R_s \geq 1$, võib toru külgalal mõjuva momendi arvutada järgmiste juhiste kohaselt:

- omakaalust tekkiv moment on -2/3 toru laes mõjuvast momendist
 - liikluskoormast tekkiv moment on -1/3 toru laes mõjuvast momendist
- liikluskoormusest tekkiv moment külgalal kasutuspiiriseisundis arvutatakse alati skeemi järgi $M_{td.s.sivu} = - \Psi_{\gamma_{trafik.s}} * M_t/3$.

4.1.3 Mõõdistamine

Teesildadel on väikseim lubatud lehepaksus 3 mm, kui toru läbimõõt on $\geq 2,5$ m; ja 2,5 mm, kui toru läbimõõt on $< 2,5$ m.

Raudteesildadel on väikseim lubatud lehepaksus $0,001 \cdot \text{läbimõõt}$, kuid vähemalt 4 mm, kui toru läbimõõt on $\geq 2,5$ m; ja vähemalt 3,5 mm, kui toru läbimõõt on $< 2,5$ m.

Kui tellija pole teisiti teatanud, siis projekteeritakse uued terastoru- ja terasvõlvsillad nii, et teraslehe paksus ja poldliidete tugevus on kogu ristlõike ulatuses samasugune. Nii välditakse torusilla põhjaosa tugevamat sööbimist. Torusildade kandvuskontrolle tehes võidakse kandevõimet hinnates arvesse võtta tegelikku lehepaksust, poldliidete tugevust ja koormuste tegelikku jaotumist.

Terase voolupiir määratakse Maanteeameti „Teraskonstruksiooni juhiste” /8/ järgi. Kui keerdõmblusega toruprofiile tehakse külmsurvetötlusega madala konstruksiooniga torusildadeks, siis tuleb terase voolupiir jagada lisavarukoefitsiendiga $\gamma = 1,15$.

Ristlõike lokaalne mõlkumine arvutatakse Rootsi juhendi /7/ lisa 1 või Soome ehituseeskirjade teraskonstruksioonide juhendi B7 /9/ järgi. Kui toruprofiil on väikese painderaadiuse tõttu gofreeritud ka põikisuunaliselt, tuleb voolavusmomenti Rootsi juhendi järgi piirata 60 protsendini gofreerimata väärtusest. Samasugune lahutus tuleb teha ka konstruksiooni paindejäikusest. See kehtib ainult üle 5 mm paksustele lehtedele. Alla 5 mm paksuste lehtede puhul tuleb paindevõime vähendus arvutada eraldi.

Terastorusilla nõtkumist, piisavat jäikust paigaldusajal ja pinnaserõhu ületumist elliptilise silla alanurgas kontrollitakse Rootsi juhendi /7/ kohaste kontrollmeetoditega ja veendudes, et torusilla jäikusväärtused ja ristlõike osade painderaadiuste suhted ning konstruksiooni jäikusarvud vastavad mainitud juhendi nõuetele.

Torusilla tegija peab kasutama liidetes enamasti eeltestitud ja heaks kiidetud eripolte. Poldi pea ja mutri terase vastu jäävad puutepinnad peavad olema koonusjad või sarnasel viisil vormitud, nii jääb kokkupuude lainja teraspinnaga tihe ja suurendab hõõrdumist. Testimisel tuleb veenduda, et eripoldidel on sama murdumis- ja väsimustugevus kui juhendi B7 standardile vastaval poldil. Poldide tugevust võib eelmainitud tingimuste ja alltoodud lisatingimuste korral arvutada staatilisel mõõdistamisel juhendi B7 järgi, kasutades nii tõmbe- kui nihketugevuse jaoks 0,85-kordseid tugevusväärtusi (vt juhend B7 /9/ punkt 5.1):

- poldi vastupidavus on piisav, kui ristlõikealana arvestatakse nii tõmbe- kui ka nihketestis üksnes poldi pingeristlõike ala
- ava suurus on maksimaalselt 4 mm suurem kui poldi nimiläbimõõt
- poldi suurus on vähemalt M20
- pingepindala on vähemalt $A_{\text{eff}} = 0,78 \times \text{brutopindala}$

- poldi pead ja mutrid on niimoodi vormitud, et poldi või lehtterase puutepinnal ei toimu murdumist, kui polti tõmmatakse kuni murdumistugevuseni välja vastu ava, mille suurus on vähemalt 4 mm suurem poldi nimiläbimõõdust
- poldi pead ja mutrid on nii vastupidavad, et murdumine nii tõmbe- kui väsimistestis toimub alati poldi varre, mitte poldi pea ega mutri kohalt; testimistingimused peavad vastama torusilla pikiliitele
- poltide pingutus vastab InfraRYL-i /10/ osa 42040.3.5 tabelile 2
- lehtede pikiliidetes on poldid paigutatud vähemalt kahe reana ja poltide minimaalne arv on üks polt vaheldumisi iga laine harjal ja põhjas (joonis 10, vasakpoolne joonis)
- mõõt on vähemalt 50 mm (joonis 10)
- kruviliide mõõdistatakse ühelõikelisena.

Kui poldi arvutuslik nihkekindlus ei ole vähemalt 25% suurem kui juhendi B7 /9/ järgi arvutatud kindlus servarebendi suhtes, tuleb nihketugevust vastavalt vähendada. Taluvus nii servarebenemise kui nihkumise suhtes arvutatakse poldi pingepindala või sellele vastava poldi läbimõõdu järgi.

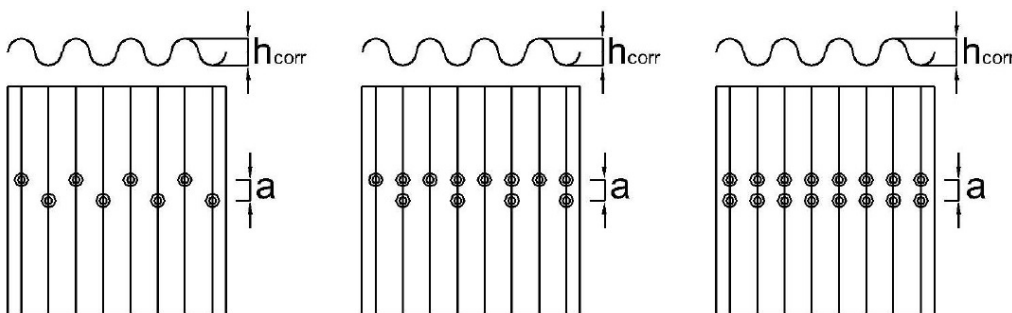
Poldi läbilõikumistugevus on:

$$F_{Rp} < 0.6 * f_{yd} * t * \pi * D_b \quad (11)$$

t = jätkatava terase paksus

D_b = mutri või poldipea välisläbimõõt.

Lehe sisse tehtud poldiavad ei mõju terase tugevusele nõrgendavalt, kui poldid on paigutatud joonise 10 kohaselt vähemalt kahe reana ja polte on ühes reas maksimaalselt üks kas laine harja või põhja kohta.



Joonis 10. Avade mõju terase vastupidavusele.

Toru pikisuunas peab lehtede üleulatus olema vähemalt poole laine pikkune. Üleulatuskoha kinnitavate poltide vaheline kaugus tohib olla maksimaalselt 250 mm.

Kui poltliite ehitus on kavandatud selline, et ühendatavad lehed ei asetu tihedalt üksteise vastu, siis poldi nihketugevust arvesse ei võeta (joonis 11). Suurimaks lubatud lehtedevaheliseks praoks peetakse poldi varre nimiläbimõõdu üht kümnendikku.



Joonis 11. Polt, millel ei ole nihketugevust.

Torusilla ja kruviliidete väsimistugevus määratakse Soome ehituseeskirjade teraskonstruksioonide juhendi /9/ peatüki 7 järgi, võttes arvesse torusilla tavapärase silla omast väiksemat kavandatud kasutusaega (teesillad 50 aastat, raudteesillad 100 aastat). Koormustsüklite arv on teesildadel $1 \cdot 10^6$ enamasti kasutava väärtuse $2 \cdot 10^6$ asemel. Konstruksiooniklass on teeliikluse sildadel 2, kui ava mõõt D on maksimaalselt 5 m, ja muul juhul 1. Raudteesildade konstruksiooniklass on alati 1.

Poldi varre väsimistugevust arvutades kasutatakse nimitugevustena euronormides antud väärtusi, mis on märgitud tabelis 3.

Tabel 3. Terasse väsimistugevused.

	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
Tõmme, Δf_{ekv}	50	63
Nihe, Δf_{vekv}	100	126
Nihe, redutseeritud $\Delta f'_{vekv}$	32	40

Kuna löikele eelnevalt antud väärtus Δf_{vekv} kehtib ainult juhtumil, kui nihe toimub poldi selles osas, kus ei ole keeret, kasutatakse nimitugevusena siiski redutseeritud väärtust $\Delta f'_{vekv} = 32$ või 40 N/mm^2 .

Väsimispiiri arvutusväärtus Δf_d saamiseks jagatakse vabavõnkumise piir Δf_k osavaruteguriga, mis on teesildadel $\gamma_m = 1,4$ juhul, kui vaba ava on alla 5 m ning muul juhul $\gamma_m = 1,6$. Raudteesildadel on väsimuse osavarutegur alati $\gamma_m = 1,6$. Väsimistugevuse arvutusväärtus saadakse tabelist 3. Väsimismöödistamist ei tehta erikoormustele (Ek1 ja Ek2) ega Lk1/2 koormusele, samuti mitte poltliidete terase servarebendile ega läbilõikumisele.

Lõplikud möödistamisel kasutatavad väsimistugevuse väärtused on antud tabelis 4.

Tabel 4. Väsimispiiri arvutusväärtused.

Kontrollitav osa	Teesillad $D \leq 5,0$ m ($\gamma = 1,4$) Δf_d [N/mm ²]	Teesillad $D > 5,0$ m ($\gamma = 1,6$) Δf_d [N/mm ²]	Raudteesillad ($\gamma = 1,6$) Δf_d [N/mm ²]
Terase pingelaine suunas	107	93	74
Põikisuunas gofreeritud profiil	84	73	58
Kruvi nihe	28	24	19
Kruvi tõmme	45	39	31

Terase pingekoikumine arvutatakse liikluskoormuse normaaljõule ja paindemomendile Rootsi möödistamisjuhendit /7/ kasutades. Liikluskoormuse või rongikoormuse põhjustatud painde kõikumine on $1,5 \cdot \Psi \cdot |M_t|$. Poltliite väsimist arvutades on vastav kõikumine $\Psi \cdot |M_t|$.

Arvutades väsimist mujal kui toru lagipunktis võib paindemomendi suurimat väärtust redutseerida kattesügavuse paksuse suurenedes või külglekkide alal Rootsi juhendi /7/ järgi. Kui poltliide asub lae- ja külgleki piirialal, võib paindemomendina kasutada alade maksimaalmomentide absoluutväärtuste keskmist.

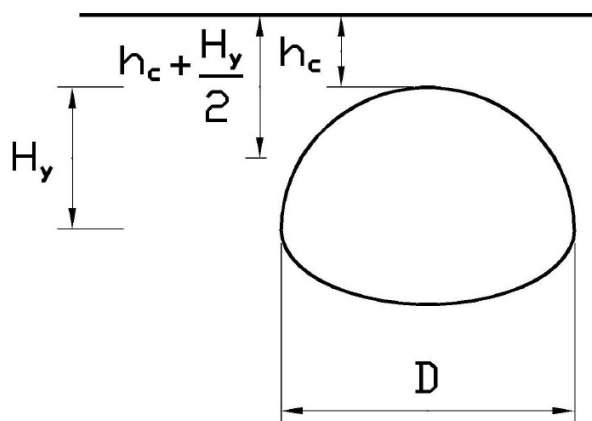
Terastorusilla alus- ja ümbrusetäite pinnaseparameetrina kasutatakse tabelis 5 ja joonisel 13 märgitud väärtusi, kui alus- ja ümbrusetäited vastavad terastorusildade ehitamise kvaliteedinõuetes /11/ olevatele materjali- ja tihedusnõuetele. Vaheväärtused interpoleeritakse sirgjooneliselt.

Tabel 5. Alus- ja ümbrusetäite pinnaseparameetrid.

	Kandva või jagava kihi materjal (purustatud kruus G_p 0/63)	Jagava kihi materjal (looduslik kruus)
Tangensmoodul (MPa) kui $h_c + H_y/2 = 1$ m	48	38
Tangensmoodul (MPa) kui $h_c + H_y/2 = 10$ m	65	55
Sisehõõrdenurk $\varnothing_k$ (°)	45	40
Mahukaal γ [kN/m ³]	21	20

h_c = täitesügavus (m)

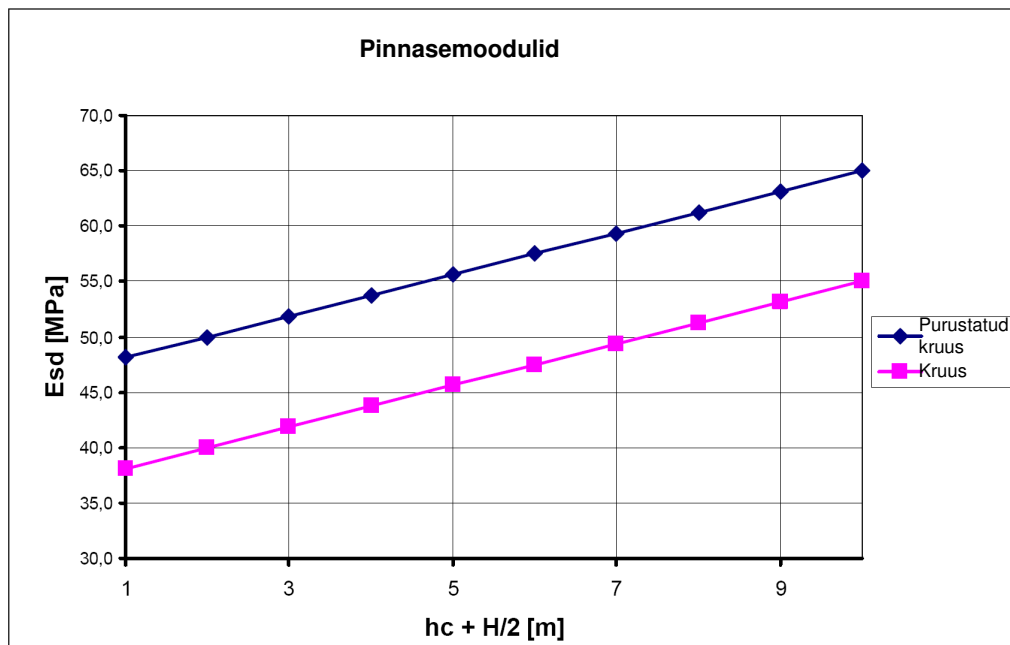
H_y = toru ülaosa kõrgus (m), mõõdetakse toru välimistest punktidest toru lagipunktini.



Joonis 12. Pinnasemooduli kontrollimissügavus.

Projekteerija peab märkima mõõdistamisel kasutatud täitepinnase liigid ja pinnaseparameetrid nii arvutustes kui ka joonistel. Kui pinnaseliike ehitustöö käigus muudetakse, käsitletakse seda projektimuudatusena.

Kui ehitamistööl ei saavutata alus- ja ümbrusetäitele nõudeks seatud tihedusastet 95% parandatud Proctori katsel määratud maksimaalsest lahtisest kuivmahukaalust, tuleb tabelis 5 või joonisel 13 esitatud moodulväärtusi redutseerida. Kui saavutatud tihedusaste on 92%, korrutatakse moodulväärtused kordajaga 0,65. Vaheväärtused interpoleeritakse sirgjooneliselt.



Joonis 13. Pinnasemoodul eri sügavustel (95% parandatud Proctor)

4.1.4 Konstruktsiooni stabiilsus

Konstruktsioonide jõusuurused võib arvutada Rootsi juhendi „Dimensionering av rörbroar” /7/ järgi, kasutades Soome juhendite kohaseid koormuse ja materjali osavarutegureid. Tabeli 6 koormuste ja materjalide osavarutegurid on koos tabelis mainitud eranditega Maanteeameti juhendite „Sildad koormused” /3/ ja „Vundamendi ehitusjuhised sillaprojekteerimisel” /12/ kohased.

Pealis- ja ümbrusetäite omaduste kõikumist võetakse arvesse kihtide koormusvaruteguri abil. Ümbruse- ja pealistäite omakaalu koormusvarutegurid tuleb valida selle järgi, kuidas saadakse kõige ebasoodsam mõju. Samale pinnasematerjalile ei ole siiski vaja seada erinevaid varutegureid, kui pinnasematerjali kasutatakse nii pealis- kui ümbrusetäiteks.

Tabel 6. Varutegurid.

Koormustegurid		
Püsikoormus, kasutuspiirseisund	$\Psi_{Y_{jord.s}}$	1
Püsikoormus, piirseisund max	$\Psi_{Y_{jord.u.max}}$	1,2 või 0,9
Teesillad:		
- Liikluskoormus, kasutuspiirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.s}}$	1,0 või 0
- Liikluskoormus, piirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.u}}$	1,8 või 0
- Raske erikoormus, piirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.u}}$	1,4 või 0
- Liikluskoormus, väsimuspiirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.f}}$	$0,4-0,02 \cdot D \geq 0,25$
Raudteesillad:		
- Rongikoormus, kasutuspiirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.s}}$	1,0 või 0
- Rongikoormus, piirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.u}}$	1,6 või 0
- Rongikoormus, väsimuspiirseisund	$\Psi_{Y_{trafik.f}}$	$0,8-0,5 \cdot [\log_{10}(D)-0,3]$
Materjalitegurid		
Teras, kasutuspiirseisund	$Y_{n.s.stål}$	1,0
Teesillad:		
- Teras, piirseisund	$Y_{n.u.stål}$	1,0 kui $D \leq 3$ m $1+0,05 \cdot (D-3)/m$ kui $3 \text{ m} < D < 5 \text{ m}$ 1,1 kui $D > 5 \text{ m}$
- Teras, väsimuspiirseisund	$Y_{n.f}$	1,4 kui $D \leq 5 \text{ m}$ 1,6 kui $D > 5 \text{ m}$
Raudteesillad:		
- Teras, piirseisund	$Y_{n.u.stål}$	1,1
- Teras, väsimuspiirseisund	$Y_{n.f}$	1,6
Geotehnilised varutegurid		
Hõõrdenurga stabiilsus, kasutuspiirseisund	$Y_{k.\phi}$	1,00
Tangensmooduli stabiilsus, kasutuspiirseisund	$Y_{k.E}$	1,00
Hõõrdenurga stabiilsus, piirseisund	$Y_{m.\phi}$	1,25
Tangensmooduli stabiilsus, piirseisund	$Y_{m.E}$	1,25

4.1.5 Lubatud hälbed

Toru projektimõõtmetes tuleb arvesse võtta ehitamisel kehtivaid valmis konstruktsiooni kvaliteedinõudeid ja hälbeid /11/, eriti järgmisi, toru lõpliku valikuga seotud nõudeid: Silla vaba ava lubatud hälve silla ehitusprojektis märgitud mõõtmetest on $\pm 2,5\%$ ja toru kõrgus $\pm 2\%$ vaba ava mõõtmetest arvutatult. Ehitusprojektis esitatud liiklustehnilised mõõtmekad ja kattesügavuse minimaalväärtus (teesildadel 500 mm, raudteesildadel 1400 mm) ei tohi olla väiksemad.

Projektis tuleb esitada ava vaba siseruumi mõõtmekad või joonisele 5 vastavad ava liiklustehnilised mõõtmekad, mis ei tohi olla väiksemad. Ehitusprojektis tuleb uuendada vaba ava ja kõrguse mõõtmekad, kui lõplik torutüüp on valitud.

Ilma uue mõõdistamiseta võib toru kõrgus- ja/või laiusmõõtmekad muuta maksimaalselt $0,01 \cdot D$, kuid siiski maksimaalselt 50 mm ja ainult nii, et hälbe kuju säilib eelmainitud suuruses ja ristlõike kõigis osades igal pool samasuunalisena. Toru terasmaterjali tugevus või gofreeritud lehe jäikus, paindejäikus, pindala või muud lehe tugevust ja jäikust mõjutavad väärtused ei tohi olla väiksemad.

4.2 Kasutusaja mõõtmine

4.2.1 Üldist

Kasutusaja mõõtmise eesmärk on kontrollida toru vastupidavust kavandatud kasutusaja või eraldi seatud siht-kasutusaja saavutamiseks.

Selgitatakse välja terastoru ja selle eri osade kasutustingimused ning nende põhjal määratakse vajalikud lisakaitsemeetmed, mille abil saavutatakse sihiks olev kasutusaeg. Väljaselgitamisel kasutatakse tingimuste klassifikatsiooni ja mõõdistamine tehakse punkti 4.2.6 järgi. Sel meetodil arvutatud kasutusaeg ei ole täpne, kuid näitab kasutusaja suurusjärku ja seda saab kasutada erinevate variantide võrdlemiseks.

4.2.2 Vee kvaliteedi mõju

Vee kvaliteedil ja püsival voolukiirusel on otsustav tähtsus torutüübi ja lisakaitse valimisel. Ilma lisakaitseta võib terastoru teatud tingimustel kiiresti korrodeeruda.

Korrodeerumine vees oleneb mitmest eri tegurist. Vesi võib sisaldada söövitavaid aineid kas lahustunult või osakestena. Voolav vesi ja selles olevad pinnaseained põhjustavad toru kaitsekihtide kulumist.

Projekti lähteandmeteks ja tingimusklassi määramiseks on vaja vee pH-väärtust ja voolukiirust. Vee pH-väärtus tuleb mõõta sillakoha uuringutel. Vana torusilda uuendades võib kasutada Sillaregistri kontrollandmetes olevat pH-väärtust, kui seda on uuendatud maksimaalselt 5 aastat tagasi.

Möödistusvoolukiirus arvutatakse kanali aastase keskmise vooluhulga järgi, mille väärtus saadakse Keskkonnaameti avahinnangus mainitud vooluhulgast (HQ_{20}) ja vastavast kanali ristlõikepindalast veekõrgusel HW_{20} , korrutades nii saadud voolukiiruse arvuga 0,65.

4.2.3 Tingimusklassid

Toru eri osad klassifitseeritakse kasutustingimuste põhjal tingimusklassidesse 1–4. Tingimusklassid tuleb projektis alati ära märkida.

Tingimustegur k_i ($i = 1–4$) on seotud tingimusklassiga ning näitab toru ja selle kaitsekihtide kulumiskiirust võrrelduna tingimusklassiga 1.

Möödistusvoolukiirusena kasutatakse tingimusklassides keskmiselt kahe aasta vältel kanalis esinevat keskmist voolukiirust v_{HW} [m/s] kas kõrgvee HW või tulvavee HQ ajal.

Toru eri osad kuuluvad tingimusklassidesse 1–4 järgmiselt:

Tingimusklass 1, tingimustegur $k_1 = 1$

Liiklustunnel või jalakäijatunnel, kui üle- ega läbikäiguteed ei soolatata:

- kogu toru, välja arvatud toru sisekülje servaosad 0,5 meetri kõrguselt maapinna kohalt ja alt

Jõesild:

- toru sisekülje ülaosa 0,5 m keskmise tõusutaseme (MW) kohalt
- toru väliskülg, kui ülekäiguteed ei soolatata

Tingimusklass 2, tingimustegur $k_2 = 1,5$

Liiklustunnel:

- toru sisekülje servaosad 0,5 meetri kõrguselt maapinna kohal ja all

Liiklustunnel või jalakäijatunnel, kui läbikäiguteed soolatatakse või kui toru toimib karjatunnelina:

- toru sisekülje alaosa, ulatudes 0,5 m maapinna kohale.

Liiklustunnel ja jõesild, kui ülekäiguteed soolatatakse ning toru peal olevasse ümbrusetäitesse pole ehitatud vettpidavat kaitset:

- toru väliskülg tervikuna

Tingimusklass 3, tingimustegur $k_3 = 2,5$

Jõesild:

- toru sisekülje alaosa, ulatudes 0,5 m keskmise tõusutaseme (MW) kohale, kui
 - vee pH on > 4 või
 - pisut kulutav vool, liivapõhi
 - möödistusvoolukiirus $< 1,5$ m/s ja $< 1,2 + \ln(h_{HW})/4$ [m/s], kus h_{HW} on vastav veesügavus [m]

Tingimusklass 4, tingimustegur $k_4 = 4$

Jõesild:

- toru sisekülje alaosa, ulatudes 0,5 m keskmise tõusutaseme (MW) kohale, kui
 - vee pH on 3–4 või
 - mõõdukalt kulutav vool, liiva- või kruusapõhi
 - mõõdistusvoolukiirus $< 4,5 \text{ m/s}$ ja $< 3,1 + \ln(h_{HW}) \text{ [m/s]}$, kus h_{HW} on vastav veesügavus [m].

Tingimusklassifikatsiooni ei kasutata, vaid objekt projekteeritakse erijuhtumina, kui

- vee pH on < 3 või
- voolukiirus $> 4,5 \text{ m/s}$.

4.2.4 Terastoru kasutusaega mõjutavad tegurid

Terastoru vastupidavust korrosioonile mõjutavad lehepaksus, tsinkpinne ja lisakaitse.

Lehepaksus

Konstruksiooni vastupidavusel ja deformatsioonide vältimisel põhinevad teraslehe minimaalsed paksused on märgitud punktis 4.1.3.

Kasutusaja arvutustes võib korrosioonivaruks arvestada 20% toru lehepaksusest. Lehepaksuse osa T1 toru kasutusajas on seega 0,2 x lehepaksus jagatuna korrosioonikiirusega. Lehepaksust suurendades saab toru mõõdistuskasutusaega pikendada, ehkki see meetod on kallis ja ebatõhus.

Kasutusaja mõõtmisel kasutatavad terastoru lehepaksuse korrosioonikiirused eri tingimusklassides on märgitud tabelis 7.

Tsinkpinne

Tsingikihi paksusena kasutatakse kasutusaja arvutustes tabelite 1 ja 2 keskmise kihipaksuse väärtusi. Tsingikihi eluea osa T2 toru kasutusajas on tsingikihi paksus jagatuna korrosioonikiirusega.

Kasutusaja mõõtmisel kasutatavad tsingikihi korrosioonikiirused eri tingimusklassides on märgitud tabelis 7. Alumiiniumtsingikiht korrodeerub ainult 30% ulatuses tsingikihi väärtustest.

Lisakaitse: värv või pinne

Tsinkpinde ja epoksüvärvi moodustatav kombineeritud pinde eluiga on 1,5-kordne võrreldes üksikute osakihtide kokkuliidetud elueaga. Lisakaitse eluea osa T3 toru kasutusajas on kaitsekihi paksus jagatuna kulumiskiirusega.

Kasutusaja mõõtmisel kasutatavad värvimissüsteemide ning muu polümeerkattega tehtud lisakaitsete kulumiskiirused eri tingimusklassides on märgitud tabelis 7.

Tabel 7. Kasutusaja mõõtmisel kasutatavad korrosiooni- ja kulumiskiirused eri tingimusklassides, $\mu\text{m}/\text{v}$.

Materjal	Tingimus- klass 1	Tingimus- klass 2	Tingimus- klass 3	Tingimus- klass 4
Lehepaksumus	30	45	75	120
Tsinkpinne	2	3	5	8
Epoksüpiigi- või epoksütõrvavärv	4	6	10	15
Vaiguga modifitseeritud epoksüvärv	3	5	8	12
Muu polümeerpinne	2,5	3,5	6	9,5

4.2.5 Lisakaitse

Terastoru lisakaitset on vaja lisaks tsinkpindele rasketes tingimustes ja eriti veetoru alaosas, kus veekõrguse kõikumisala on vigastustele kõige altim. Lisakaitset on enamasti vaja, kui

- vee vool on tugev
- vee pH on madal
- toru paigutatakse vette ja täitematerjal on purustatud kiviaines
- paadi- vm liiklus võib tsinkpinnet kahjustada
- toru peamine kasutusotstarve on karjatunnel
- välimisaspektidele on seatud erilisi nõudmisi.

Lisakaitsemeetodina tulevad kõne alla

- värvimine
- muu polümeerpinne
- filterriie
- pritsbetoon
- katoodkaitse.

Tsingi ja värvi moodustatud kombineeritud pinde eluiga on pikem kui tsingi- ja värvikihtide kokku liidetud eluead. Lisakaitse kasutusaega pikendav mõju arvutatakse kasutusaja mõõtmisel (punkt 4.2.6).

Värvipindamistöös ja pinnatöötlusprojekti koostamisel järgitakse kohalduvates osades InfraRYL-i /10/ peatüki 42050 ja SILKO-juhendi 2.354 /13/ kvaliteedinõudeid ja juhiseid.

Värvimissüsteemid ja pindamine

Tingimusklassis 1 ei ole lisakaitset enamasti vaja, korrosioonikaitseks piisab tsinkpindest. Kui liiklustunneli nähtavale sisepinnale soovitakse välimuse huvides kanda lisakaitse, võib kasutada epoksü-polüuretaan-värvimissüsteemi EPPUR 160/3-FeZnSaS (TIEL 4.20), sel juhul on võimalik valida paljude värvitoonide vahel.

Tingimusklassides 1–3 kasutatavad lisakaitsemeetodid on

- epoksüpigi- või epoksütõrvavärv CTE 120/2-FeZnSaS või CTE 240/2-FeZnSaS (≈ TIEL 4.3)
- vaiguga modifitseeritud epoksüvärv (R)EP 120/2-FeZnSaS või (R)EP 240/2-FeZnSaS (≈ TIEL 4.4)
- muu polümeerpinne $\geq 250 \mu\text{m}$.

Tingimusklassis 4 kasutatavad lisakaitsemeetodid on

- epoksüpigi- või epoksütõrvavärv CTE 240/2-FeZnSaS (≈ TIEL 4.3)
- vaiguga modifitseeritud epoksüvärv (R)EP 240/2-FeZnSaS (≈ TIEL 4.4)
- epoksüpinne EP 400/1-FeZnSaS.
- muu polümeerpinne $\geq 250 \mu\text{m}$ (vt punkt 3.4.4).

Kui mainitud värvimissüsteemide kihipaksus ei ole kasutusaega mõõtes piisav, võib sellele lisada ühe 70 μm värvikihi.

Filterriie sobib kasutamiseks toru väliskülje tsinkpinde ja lisakaitse kaitsmiseks ehitamise ajal tekkivate vigastuste eest. Kui ümbrusetäites kasutatakse purustatud kiviainest, on filterriide kasutamine lisakaitseks kantud värvikihi kaitsmiseks vältimatu ning ainult tsinkpinde kaitsmiseks soovitatav. Filterriide kasutusklass peab olema N3. Raudteesildadel ei tohi filterriiet kasutada.

Pritsbetooni võib kasutada veetorude põhjalehtede kaitsmiseks tugevast voolust tekkiva kulumise eest. Üldiselt kasutatakse pritsbetooni ainult kasutusaja pikendamiseks mõeldud parandusmeetodina /14/.

Katoodkaitse on võimalik variant lisakaitseks tingimusklassides 3 ja 4. Kaitse jaoks on vaja erispetsialisti tehtud sillapõhine projekt ja püsihooldusleping. Enamasti kaalutakse katoodkaitset ainult kasutusaja pikendamiseks mõeldud parandusmeetodina.

4.2.6 Kasutusaja lihtsustatud mõõtmine

Kasutusaja mõõtmine tehakse igasse tingimusklassi kuuluvale toruosale eraldi.

1. Määratakse toru erinevates koormustingimustes olevate osade tingimusklassid (1, 2, 3 või 4).

2. Arvutatakse toru mõõdetav kasutusaeg KI järgmiste valemitega:

a) tsingitud toru ilma lisakaitseta

$$KI = T1 + T2$$

b) tsingitud toru lisakaitsega

$$KI = T1 + 1,5 * (T2 + T3)$$

kus $T1$ = lehepaksuse osa mõõdetavas kasutusajas

$T2$ = tsingikihi eluiga

$T3$ = lisakaitse eluiga

Eluigade $T1$, $T2$ ja $T3$ arvutamiseks vajalikud andmed on punktis 4.2.4.

3. Võrreldakse mõõdetavat kasutusaega kavandatud kasutusajaga või seatud siht-kasutusajaga ja kohandatakse osategurid selliseks, et mõõdetav kasutusaeg seda ületab.

Sel meetodil arvutatud kasutusaeg ei ole täpne, mistõttu arvutatud mõõdetava kasutusaja võrdlemisel siht-kasutusajaga on lubatud hälve -2 aastat.

Näide 1: Liiklustunnel, üle- ega läbikäiguteed ei soolatata. Lehepaksus 3,0 mm; tsinkpinde paksus 70 µm. Kavandatud kasutusaeg on 50 aastat.

Väliskülg ja sisekülje üla- ja alaosa, tingimusklass 1:

$$- KI = T1 + T2 = 0,2 * 3000 \mu\text{m} / 30 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 2 \mu\text{m} = 20,0 + 35,0 = 55,0 \text{ a, mis on } > 50 \text{ a.}$$

Sisekülje servaosad, tingimusklass 2:

$$- KI = T1 + T2 = 0,2 * 3000 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} = 13,3 + 23,3 = 36,6 \text{ a, mis on } < 50 \text{ a.}$$

➔ Lisakaitse, epoksüvärv 120 µm, sel juhul:

$$- KI = T1 + 1,5 * (T2 + T3) = 0,2 * 3000 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 1,5 * (70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} + 120 \mu\text{m} / 6 \mu\text{m}) = 13,3 + 1,5 * (23,3 + 20,0) = 78,3 \text{ a, mis on } > 50 \text{ a.}$$

Näide 2: Veetoru, ülekäiguteed soolatatakse, vee pH 3,5; voolukiirus 2,5 m/s. Lehepaksus 3,5 mm; tsinkpinde paksus 70 µm. Kavandatud kasutusaeg on 50 aastat.

Sisekülje ülaosa, tingimusklass 1:

$$- KI = T1 + T2 = 0,2 * 3500 \mu\text{m} / 30 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 2 \mu\text{m} = 23,3 + 35,0 = 58,3 \text{ a, mis on } > 50 \text{ a.}$$

Väliskülg, tingimusklass 2:

$$- KI = T1 + T2 = 0,2 * 3500 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} = 15,6 + 23,3 = 38,9 \text{ a, mis on } < 50 \text{ a.}$$

➔ Lisakaitse, epoksüvärv 120 µm, sel juhul:

$$- KI = T1 + 1,5 * (T2 + T3) = 0,2 * 3500 \mu\text{m} / 45 \mu\text{m} + 1,5 * (70 \mu\text{m} / 3 \mu\text{m} + 120 \mu\text{m} / 6 \mu\text{m}) = 15,6 + 1,5 * (23,3 + 20,0) = 80,6 \text{ a, mis on } > 50 \text{ a.}$$

Sisekülje alaosa, tingimusklass 4:

$$- KI = T1 + T2 = 0,2 * 3500 \mu\text{m} / 120 \mu\text{m} + 70 \mu\text{m} / 8 \mu\text{m} = 5,8 + 8,8 = 14,6 \text{ a, mis on } < 50 \text{ a.}$$

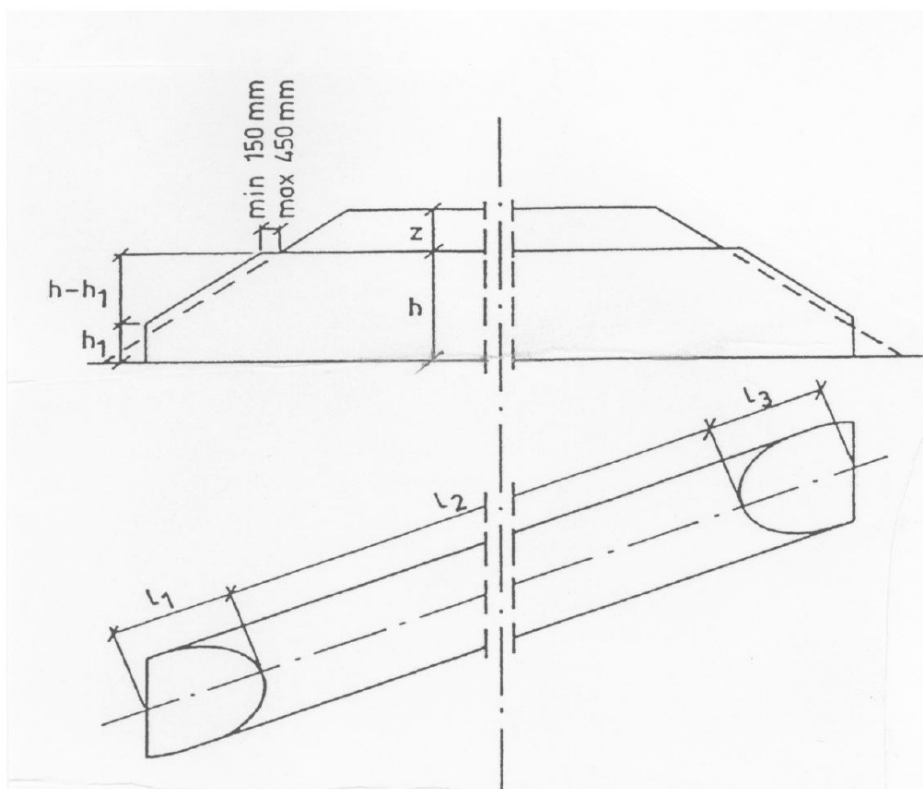
➔ Lisakaitse, vaiguga modifitseeritud epoksüvärv 240 μm , sel juhul:

$$- KI = T1 + 1,5 * (T2 + T3) = 0,2 * 3500 \mu\text{m} / 120 \mu\text{m} + 1,5 * (70 \mu\text{m} / 8 \mu\text{m} + 240 \mu\text{m} / 12 \mu\text{m}) = 5,8 + 1,5 * (8,8 + 20,0) = 49,0 \text{ a, mis on lubatud hälvet arvestades vastuvõetav.}$$

4.3 Toru kalle ja suunanurk

Toru otsad lõigatakse enamasti nõlva kalde järgi. Kallet alustatakse arvestuslikust kõrgusest, mis on kolmandik toru kõrgusest. See vastab madala konstruktsiooniga torudel alanurgalehe ülaserva kõrgusele. Kaldesuhe m  aratakse joonisel 14 näidatud viisil. Toru otste kaldul ikamisel tuleb arvesse võtta ka toru suunanurka.

Toru kaldeosa läbipaine sissepoole ei tohi põhjustada silla vaba ava vähenemist ega ristlõike kitsenemist rohkem kui $D/150$. Laugjatel nõlvadel tuleb toru kaldus osa tugevdada lisaj igastuselementidega. Lisaj igastuselemendid on vajalikud ka torudel, mille viltusus on märgatav. Kõne alla võib tulla ka k venduspinnase kasutamine edasise pinnaser hu vähendamiseks, arvestades mõõdetud kasutusaega.



Pikkus:

$$- \text{p hjpikkus} = l_1 + l_2 + l_3$$

$$- \text{laepikkus} = l_2$$

Tähelepanu! Tuleb kontrollida, kas $l_2 \geq l_1 + l_3$

Kalle:

$$- \text{kalde algamisk rgus } h_1 = h/3$$

$$- \text{kaldesuhe} = (h - h_1) / l_1$$

z = kattesügavus

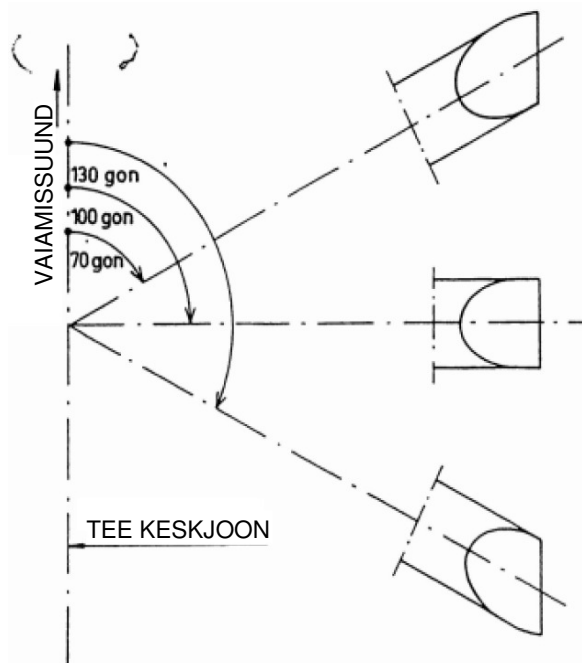
Joonis 14. Toru pikkuse ja kaldesuhte määramine.

Toru püütakse esmajärjekorras paigutada ristloodselt tee alla. Toru võib paigutada tee keskjoone suhtes viltu, kui

- toru paigutatakse kanalisse, mida ei ole otstarbekas siirata
- altviiva tee suund eeldab viltust ristumist
- nii on võimalik toetada toru tervikuna kandvale aluspinnasele.

Viltu paigutatud toru ots võib olla tee suunaline (joonis 14) või sellest erinev, ka ristloodne.

Teesildadel on suunanurga soovituslikud väärtused vahemikus 70–130 gon (joonis 15). Raudteesild tuleb paigutada ristloodselt raudtee alla.



Joonis 15. Suunanurk.

4.4 Toru pikkus

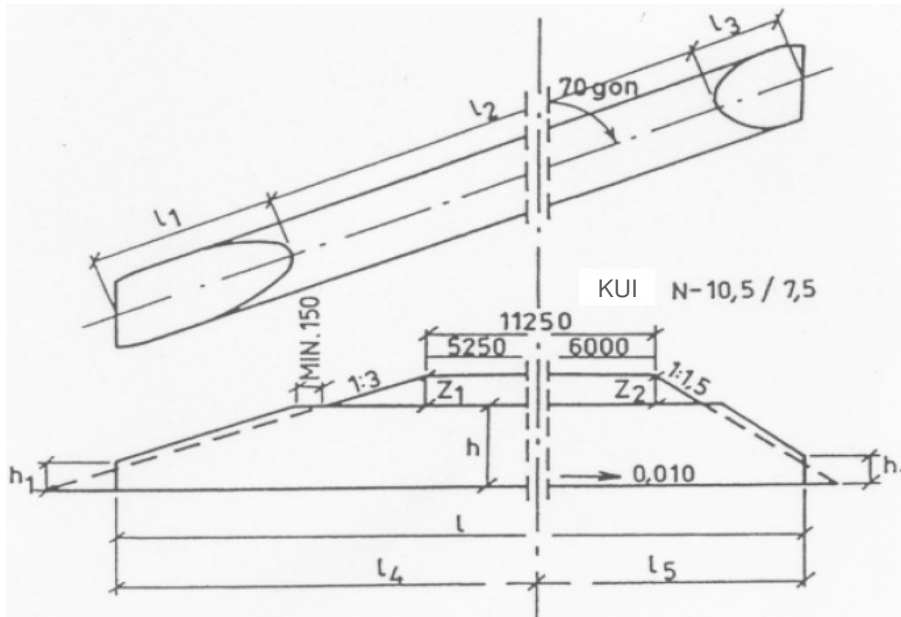
Toru pikkusega võidakse mõelda nii toru lae keskjoone pikkust (laepikkus) kui ka toru põhja keskjoone pikkust (põhjapikkus) (joonis 14). Sillaregistrisse märgitakse ainult laepikkus.

Toru laepikkus määratakse tee ristlõike ja kattesügavuse põhjal. Kui toru ots on kaldu lõigatud, peab toru ülapiind ulatuma minimaalselt 150 mm ja maksimaalselt 450 mm teenõlvast väljapoole. Raudteenõlvade laiuses võetakse arvesse rööbaste tõstet (200 mm).

Toru põhjapikkus määratakse viltulõigatud torudel laepikkuse, nõlva kalde, kalde algamiskõrguse ja suunanurga põhjal (joonis 16). Põhjapikkust võib arvutatud pikkusega võrreldes suurendada nii, et toru suunaline lehejaotus on ühtlane, kuid maksimaalselt 600 mm / ots.

Kui toru ots on sirge, määratakse toru pikkus enamasti nii, et umbes kolmandik toru kõrgusest jääb teenõlva sisse. Kui toru on sellest lühem, tuleb toru ots toestada kas kõva voodri või tugimüüriaga.

Toru pikkust määrares tuleb arvesse võtta ka välimusaspekte. Sirge ots ei ole enamasti esteetiline.



Toru: pikikalle 1%, kattesügavused: $z_1 = 600$, $z_2 = 720$, kõrgus $h = 1800$, kalde algamiskõrgus $h_1 = 600$.

Laepikkus: Määratakse tee ristlõike, suunanurga ja kattesügavuse põhjal, lisatud minimaalse üleulatusega $2 * 150$ mm. Kui suunanurk on 70° , siis viltususest tekkiv pikennemistegur on $1/\sin 70^\circ = 1,12$.

$$l_2 = (11250 + 3 * 600 + 1,5 * 720 + 2 * 150) * 1,12 = 16160.$$

Põhjapikkus: Määratakse laepikkuse ja kallete põhjal.

$$l = l_2 + l_1 + l_3 = 16160 + (3 * 1200 + 1,5 * 1200) * 1,12 = 22210.$$

Lisaks määratakse pikkused l_4 ja l_5 : $l_4 = 12095$, $l_5 = 10115$.

Joonis 16. Toru pikkuse määramine, näide.

4.5 Kõrvutised torud

Kui piiratud tammikõrguse või muude põhjuste tõttu kasutatakse kõrvutisi torusid, peab torude vaheline kaugus olema vähemalt tabeli 8 kohane, et torude vahel tekiks piisav pinnase küljõud.

Tabel 8. Kõrvutiste torude minimaalkaugus.

Toru laius	Minimaalkaugus
$D \leq 3 \text{ m}$	1,0 m
$3 < D \leq 9 \text{ m}$	$D / 3$
$D > 9 \text{ m}$	3,0 m

4.6 Vundamentimine

4.6.1 Üldist

Terastorusilla vundamendi projekteerimisel järgitakse juhendit „Silla geotehnilised projekteerimisalused” /2/. Sama projekteerimisjuhendi kohaselt võetakse arvesse ka keltse mõju. Projekteerimine tuleb teha nii, et

- aluspinnase ja konstruktsiooni murdumiskindlus on piisavalt suur nii ehitamise ajal kui ka konstruktsiooni kasutusajal
- konstruktsiooni läbipained, siirded, väändenurgad ja deformatsioonid püsivad nii väikesed, et need ei häiri konstruktsiooni kasutamist ning neist tekkivad koormused ei kasva liiga suureks
- arvesse võetakse ehitamise mõju põhjaveele ja ehitamiseks vajalike täidete mõju.

Terastorusilla vundament tehakse alati süvendi põhjale või tervikliku vaialaua peale, kas kruusast või purustatud kruusast ehitatavale tihendatud alustäitele. Terasvõlvsilla terasbetoontaldmikud võib rajada ümbrusetäite mõju arvesse võttes ka otse vaiade peale.

Alus- ja ümbrusetäite materjal peab vastama väljaandes „InfraRYL 2006. Infraehitamise üldised kvaliteedinõuded, osa 1 Teed ja teepiirkonnad” /15/ esitatud jaotava või kandva kihi materjali kvaliteedinõuetele ning ei tohi sisaldada üle 63 mm läbimõõduga kive. Projekteerija määrab silla ehitusprojektiis nii alus- kui ümbrusetäite tihedusnõude kuivmahukaaluna, mis võib olla kas 92% või 95% parandatud Proctori katsega määratud maksimaalsest kuivmahukaalust.

Alustäidet tuleb laiendada toru pikkussuunas vähemalt selle paksuse võrra toru otstest väljapoole. Alustäite paksus projekteeritakse juhtumipõhiselt, võttes arvesse aluspinnase kandvust ja keltstavastase kaitse vajadust. Minimaalne paksus on 300 mm. Alustäite alaosasse tehakse vajaduse korral 100–200 mm paksune filterkiht või kasutatakse filterriiet. Liiklustunneli ehitamisel alustäidet ei kuivatata.

Terastorusildade projekteerimisel tuleb veel eriti arvesse võtta

- sisenemistammide ühendust kõrvalasuvate tee- ja pinnasekonstruktsioonidega
- kuivatamise tervikkorraldust
- vee loomulikku voolu veekogus
- läbikäigutee asukoha otstarbekohasust liikluse seisukohalt.

Silla sisenemistammid projekteeritakse juhendi „Teede vundamendi-konstruktsioonide projekteerimisalused” /16/ järgi. Juhendis on esitatud nõuded muu hulgas stabiilsusele ja lubatud läbipaindele.

4.6.2 Silla läbipaine

Terastorusilla ja terasvõlvilla aluskonstruktsioonide lubatud läbipainde, väändenurga või läbipainde erinevuse määrab alati projekteerija. Silla läbipainde hindamisel võetakse arvesse mh

- teetammist ja muudest pinnasekonstruktsioonidest moodustuvat aluspinnase lisakoormust
- silla ümbrusetäitest moodustuvat aluspinnase lisakoormust
- põhjavee pinna alanemist.

Raudteesillad projekteeritakse nii, et läbipaine ei kahjusta rongiliiklust ega konstruktsiooni.

Terastorusilla keskkohal paindub homogeensete pinnasetingimuste korral tammikoormuse mõjul rohkem kui toru otsad. Ühtlase, kogu toru pikkuses toimuva toru läbipainde korral peab toru painderaadius olema $\geq 200 \cdot H_k$ (H_k on toru kogukõrgus). Eri pikkusega torudele arvutatult saadakse nii järgmised toru lubatud läbipainde maksimaalväärtused:

<u>Toru alapinna pikkus (m)</u>	<u>Lubatud läbipaine (mm)</u>
10	60 / H_k
15	140 / H_k
20	250 / H_k
30	560 / H_k
60	1250 / H_k

H_k = toru kogukõrgus (m).

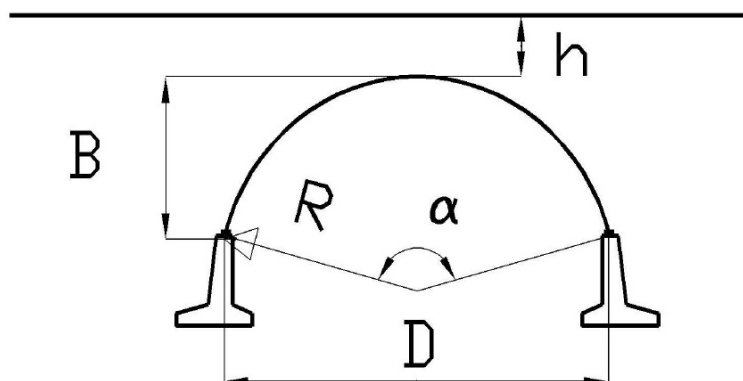
Vaheväärtused interpoleeritakse sirgjooneliselt.

Toru ühtlast läbipainet võib kompenseerida eeltõusuga, mis tohib olla maksimaalselt 50% arvutatud läbipaindest. Tõusu suurus ei tohi ületada toru tootja lubatud maksimaaltõusu.

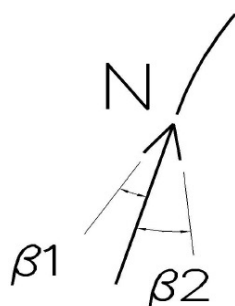
Toru pikisuunaline lokaalne läbipainde erinevus tohib olla maksimaalselt $H_k / 250$. Läbipainde erinevust kontrollides peab mõõteintervall olema $\leq 2 \cdot H_k$.

Toru pikitelje suhtes ristsuunaline läbipainde erinevus tohib põhjustada maksimaalselt 1% kalde.

Teravõlv toetatakse vundamendile kinnitatud U-kujuliste terasprofiilidega nii, et toetust ei painutata. Tugipunktile rakenduva normaaljõu saab arvutada Rootsi mõõdistamisjuhendi /7/ järgi.



Joonis 17. Terasvõlvsilla põhilised mõõtmed.



Joonis 18. Terasvõlvsilla tugireaktsioonid.

Kui muid heakskiidetavaid arvutusi ei tehta, tuleb silla vundament mõõdistada arvutustest saadavale normaaljõule, võttes arvesse igal koormusjuhul normaaljõu suunahälbed β_1 ja β_2 tangensi suunast (tabel 9).

Tabeli 9 väärtusi võib kohaldada ainult terasvõlvsildadele, mille ristlõige on ringikujuline, kaare nurk vahemikus $\alpha = 150\text{--}180^\circ$, kaare raadius vahemikus $R = 2\text{--}3$ m ja laine kõrgus 150–160 mm.

Tabelis 9 antud väärtuste h , α ja R vahele jäävad β_1 ja β_2 väärtused võib arvutada sirgjooneliselt interpoleerides.

Tabel 9 on arvutatud koormusele Lk1. Kui erikoormus Ek1 on määrav, tuleb koormusjuhtumile Nmax vastavat β_1 väärtust suurendada 30%. Tabelit 9 ei saa kasutada raudteesildade projekteerimiseks.

Tabel 9. Normaaljõu suunahälbed (koormusele Lk1).

		R = 2 m		R = 3 m	
Koormusjuhtum	h	β_1	β_2	β_1	β_2
Omakaal	0,5	0	3	0	3
Nmax		7	0	3	0
Nmin		0	7	0	5
Omakaal	1	0	2	0	1
Nmax		6	0	2,5	0
Nmin		0	4	0	5
Omakaal	2	2	0	0	1
Nmax		4	0	2	0
Nmin		1	1	0	1
Omakaal	5	3	0	0,5	0
Nmax		4	0	2	0
Nmin		2,4	0	1	0
Omakaal	10	3,1	0	2	0
Nmax		3,5	0	2	0
Nmin		3	0	2	0

Vundamenti mõõdistades võetakse arvesse eeldatavad läbipainded vundamendi pikisuunas. Vundamendi stabiilsus tuleb projekteerida nii, et selle ülaseri või toestuspunkti kohal ei liigu liikuva koormuse korral rõhtsuunas rohkem kui $0,003 \cdot (H_k + h)$ või maksimaalselt 20 mm. Siirdeid arvutades ei võeta arvesse või horisontaaljõude takistavat mõju.

4.6.3 Vundamentimisviisid

Terastorude erinevates tingimustes tüüpiliste vundamentimisviiside suunavad mudeljoonised on esitatud lisas B.

Kui sillakoht paikneb kandval pinnasel, vundamenditakse toru süvendi põhja ehitatavale tihendatud alustäitele (vundamentimisviisid A ja B).

Külmuvale pinnasele ehitatav toru vundamenditakse tihendatud alustäitele, mittekülmuvale vundamentimissügavusele ulatuva külmumatule massivahtusele, või peab torul olema külmumisvastane kaitse (vundamentimisviis C).

Kui pinnas on halvasti kandev, kuid on olemas eeldused pinnasele toetuva torusilla ehitamiseks, võib alustäite all kasutada platvormkonstruktsiooni, et täidet oleks võimalik tihendada pehme ja häirimistundliku aluspinnasega. Platvormi konstruktsiooni kohta tehakse detailsed geotehnilised ja ehitusjoonised. Platvormi võib teha ka terasest laineplekikonstruktsioonina või kõvenduskonstruktsioonina, mis tuleb projekteerida juhtumipõhiselt (vundamentimisviis D).

Kui silla alussüvend tehakse toestatud süvendis, tehakse süvendiprojekt kas ehitusprojekti osana või ehitustööga seonduva tööprojektina. Süvendiprojekti esitatakse toetuse geotehnilised ja ehitustehnilised mõõdistused ning konstruktsioonid, samuti põhjavee kontrollimine detailselt, tööetappide kaupa (vundamentimisviis E).

4.7 Terastoruga seonduvad muud konstruktsioonid ja tarvikud

4.7.1 Siirdekiil

Siirdekiil tehakse toru juurde kanali aluskonstruktsiooni külmumis- ja kandvuserinevuste ühtlustamiseks ning neist tekkivate ebaühtlaste külmumistõusude ja läbipainete põhjustatud kahju vähendamiseks. Kergliikluskanalites kaalutakse siirdekiilude vajadust sillapõhiselt. Siirdekiilud projekteeritakse juhendi „Teekonstruktsiooni projekteerimine” punkti 3.5 kohaselt /17/.

Raudteesilla siirdekiilud projekteeritakse InfraRYL-i /15/ eeskirju ja juhiseid järgides.

4.7.2 Vooderdus

Kui voolava vee, lainetuse, jää või muu kulutava jõu põhjustatud erosioon on tugev, tuleb toru ots vooderdada. Vooderdus kaitseb konstruktsiooni erosioonikahjustuste eest ja parandab selle välimust.

Tammikalletele tehakse samasugune vooderdus kui kanali muudeski osades, enamasti muru- või turbavooderdus. Toru otsad tuleb vooderdada vastupidavamalt, mistõttu tuleb kasutada kõvu vooderdusmaterjale. Vooderduse projekteerimisel võib abiks kasutada vooderduste ehitamist käsitlevaid SILKO-juhendeid /18/.

4.7.3 Tugimüürid

Tugimüüri kasutatakse toru otsas siis, kui ots on vaja teha järsema kaldega kui 1:1. Väiksematel objektidel võib hakkama saada palkvooderdusega (kihiline kivikonstruktsioon) või purustatud kiviga. Nõudlikumatel objektidel tehakse tugimüür kas terasbetoonist või kivist korvidest sillapõhise projekti järgi.

4.7.4 Kuivatamine

Liiklustunnelite puhul tuleb projekteerida pinnavee ärajuhtimine kas põhjaveerennide või -torudega või vajaduse korral tervikliku vihmavee-süsteemiga.

4.7.5 Valgustusseadmed ja kinnitid

Liiklustunnelitele on sageli vaja kinnitada valgusteid ja kaablilatte. Valgustid peavad olema lõögikindlat tüüpi. Valgustus korraldatakse tellija heaks kiidetud valgustusprojekti järgi.

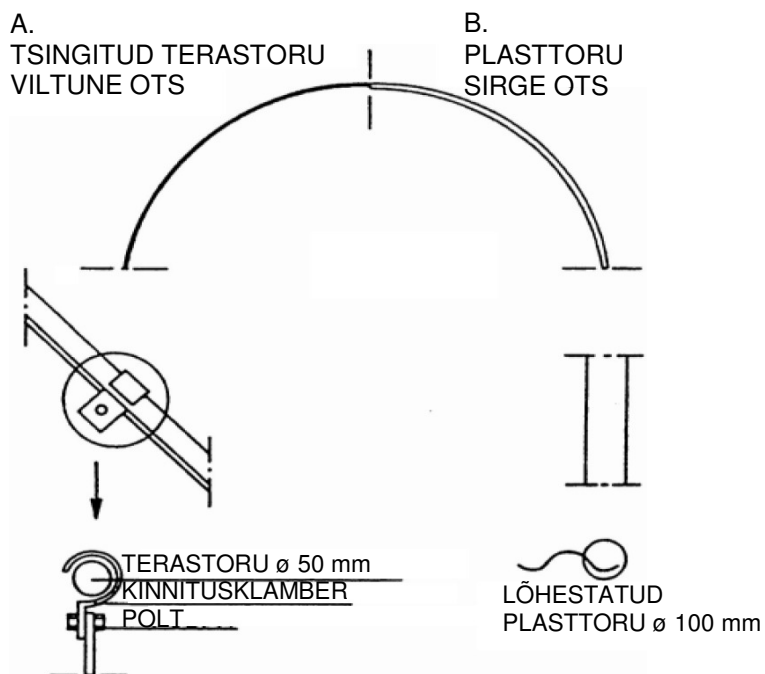
Tõmbevarras tuleb projekteerida jõesildadele, kust on vaja paadiga läbi saada ja mis on nii väikesed, et paat tuleb torust läbi tõmmata. Tõmbevarras aitab ka silla kontrollijat ja suurendab kontrollimistöö ohutust. Tõmbevarras paigaldatakse toru mõlemale küljele, kasutusotstarvet silmas pidades sobivale kõrgusele, HW-pinnast kõrgemale. Tõmbevarras tehakse tsiingitud veetorst, mis kinnitatakse torusilla tarnija paigaldatud kinnituspoltide külge.

4.7.6 Kontrolltapid

Terastorusillale paigaldatakse kolm kontrolltappi suunanurga õigsuse mõõtmise ja hilisemate kujumõõtmiste tarvis. Kontrolltapid on kuumtsingitud poldid M10x20, mis kinnitatakse toru keskjoonele toru lakke puuritud Ø 12 mm avasse nii, et poldi pea on toru siseküljel laineharjal ja mutter toru välisküljel lainepõhjal. Toru pikisuunas paigutatakse kontrolltapid toru mõlemasse otsa ja laepikkuse keskkohale kõige lähemal oleva ülemise laine põhja.

4.7.7 Liiklustunneli otsa kaitse

Liiklustunneli otsa kaitse on vajalik eriti väikeste torude korral. Kaitse võib teha näiteks joonisel 19 näidatud viisil või spetsiaalselt selleks otstarbeks valmistatud kummiprofiilidega.



Joonis 19. Liiklustunneli otsa kaitse.

4.7.8 Piirded

Terastorusilda ületava tee piirdena tuleb kasutada kokkupõrkekindluse klassi H2 nõuetele vastavat kõrget sillapiiret, kui kukkumiskõrgus altviivale teele või kanalisse on ≥ 3 m. Piire tuleb kinnitada poltkinnitusega, sillast üle viiva tee servadele juhtumipõhiselt projekteeritavale ja tüüpjoonisele R15/DK H2-21 vastava betoonkonstruktsiooni külge. Kõrge piirde minimaalpikkus on $L \geq D + 4$ m + kalded.

Kui kukkumiskõrgus on < 3 m, võib kasutada kokkupõrketestitud teepiiret (nt joonis Ty 3/51) tihendatud kahemeetrise postivahega /19/. Väikeste kattesügavuste korral tuleb arvesse võtta piirdeposti nõutavat süvistussügavust 1,5 m ja vajaduse korral tuleb piirde kinnitus projekteerida juhtumipõhiselt, näiteks üleviiva tee servadesse projekteeritava betoonkonstruktsiooni külge. Juhul, kui sillal on märkimisväärselt kergliiklust, samuti kõigil kergliiklusteedel kasutatakse silla ava juures olevas teepiirdes kõrgendusosa (näiteks tüüpjoonise R15/DK 2-5 mugandus), mille pikkus peab olema vähemalt 8 meetrit.

Lumekoristuse kaitsevõrku kasutatakse liiklustunnelitel, kui toru liiklemisava kaugus üleviiva tee servast ei ole piisavalt suur, et takistada koristataval lumel torust läbi viivale teele kukkumist.

5 VIITED

- /1/ Teede projekteerimine IV. Kuivatamine. Helsinki. Tielaitos 1993. TIEL 2140005.
- /2/ Silla geotehnilised projekteerimisalused. Helsinki. Tiehallinto 2007. ISBN 978-951-803-896-5. TIEH 2100053-07.
- /3/ Sildade koormused. Helsinki. Tiehallinto 1999. ISBN 951-726-538-2. TIEL 2172072-99.
- /4/ Raudteesildade projekteerimisjuhised RSO 21.5.2002. Helsinki. Raudteehalduse keskus.
- /5/ Betoonkonstruktsioonide juhised 2006. Helsinki. Tiehallinto 2006. ISBN 951-803-5806. TIEH 2100037-v-06.
- /6/ Raudteetehnilised juhised. 3. osa: Raudtee konstruktsioon. Raudteehalduse keskus 2002, uuendatud 2005.
- /7/ Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson, Håkan Sundqvist. KTH Arkitektur och samhällsbyggnad. ISSN 1103-4289. ISSN/KTH/BKN/R--8--SE. Brobyggnad 2000, utgåva 3, 2006
- /8/ Teraskonstruktsioonide juhised, Helsinki. Tiehallinto 2000. ISBN 951-726-610-3. TIEL 2173449-2000.
- /9/ B7 Teraskonstruktsioonid. Juhised 1996, lisa 2/2001. Soome ehituseeskirjad.
- /10/ InfraRYL 2006. Infraehitamise üldised kvaliteedinõuded, 3. osa Sillad ja ehitustehnilised osad. (RT 14-10920). Helsinki. Rakennustieto Oy 2008.
- /11/ Terastorusillad. Ehitamise kvaliteedinõuded. Helsinki. Tiehallinto 2008. ISBN 978-951-803-939-9. TIEH 2200050-07.
- /12/ Vundamendi ehitusjuhised sillaprojekteerimisel. ISBN 951-726-583-2. TIEL 2172068-99.
- /13/ Teraskonstruktsioonid. Vana ja uue tsinkpinde värvimine. Helsinki. Tiehallinto 2005. SILKO 2.354. TIEH 2230096-2.354.
- /14/ Teraskonstruktsioonid. Terastorusilla parandamine. Helsinki. Tiehallinto 2006. SILKO 2.341. TIEH 2230096-2.341.
- /15/ InfraRYL 2006. Infraehitamise üldised kvaliteedinõuded, 1. osa Teed ja teepiirkonnad. Helsinki. Rakennustieto Oy 2006. ISBN 951-682-801-9.
- /16/ Teede vundamendikonstruktsioonide projekteerimisalused. Helsinki. Tiehallinto 2001. ISBN 951-726-743-6. TIEH 2100002-01.
- /17/ Teekonstruktsiooni projekteerimine. Helsinki. Tiehallinto 2004. ISBN 951-803-4028. TIEH 2100029-04.

/18/ Sildade parandamisjuhised – SILKO. Tiehallinto. TIEH 2230096.

- SILKO 2.911 Kivipuistevoorderduse tegemine
- SILKO 2.912 Kiviplaatvoorderduse tegemine
- SILKO 2.913 Betoonplaatvoorderduse tegemine
- SILKO 2.914 Betoonkivivoorderduse tegemine
- SILKO 2.918 Kivivoorderduse tegemine
- SILKO 2.919 Kivikorvkonstruksioonide tegemine

/19/ Sildade piirded. Helsinki. Tiehallinto 2006. ISBN 951-803-691-8.
TIEH 2100046-06.

6 LISAD

Lisa A. Gofreeritud terastorude põhiandmed

Lisa B. Vundamentimisviiside suunavad mudeljoonised

Lisa C. Mõõdistusnäide

LISA A. GOFREERITUD TERASTORUDE PÕHIANDMED

A1. Konstruktsioonide tunnused ja ristlõiked

Näited üle 2-meetrise läbimõõduga terastorudes kasutatavatest konstruktsioonidest koos tähttunnusega on esitatud tabelis A1. Kasutatakse ka muid profiilikonstruktsioone.

Tabel A1. Torukonstruktsioonide ja nende gofreeringute tunnuseid.

Konstruktsioon	Gofreering ¹⁾
A12 Mitmekihiline lehtkonstruktsioon	150 x 50 (Gävle)
A2 Mitmekihiline lehtkonstruktsioon	200 x 55
C3 Keerdõmblusega konstruktsioon	125 x 26, 260 x 20/90
C5 Keerdõmblusega konstruktsioon	210 x 50 / 70

¹⁾ Märgistuses antakse profiili laine pikkus ja laine kõrgus ning laineharja laius, kui profiil on ühtlase harjaga.

Konstruktsioonide ristlõikeväärtused ja gofreeringu põhimõtte skeem on esitatud punktis A2. Uue profiili võib paindejäikuse põhjal liigitada klassi A või C, sel juhul peetakse tabeli A3 väärtusi klassi alumiseks piiriks.

A2. Gofreeritud torude ristlõikeväärtused

Tabel A2. Profiili ristlõike pindala.

Lehepaksus [mm]	Pindala [cm ² /m]			
	Konstruktsioon			
	A12	A2	C3	C5
2,5	31,5	29,6	27,7	37,2
3,0	37,7	35,5	33,2	44,6
3,5	44,0	41,4	38,8	52,0
4,0	50,4	47,3	44,3	59,4
4,6	56,7	53,3		
5,0	63,0	59,2		
5,5	69,4	65,1		
6,0	75,7	71,1		
6,5	82,1	77,0		
7,0	88,5	82,9		

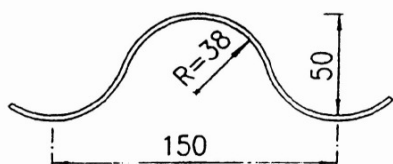
Vaheväärtused võib interpoleerida sirgjooneliselt.

Tabel A3. Profiili ristlõike paindejäikus.

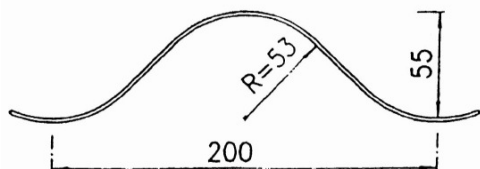
Lehepaksus [mm]	Paindejäikus [cm ³ /m]			
	Konstruktsioon			
	A12	A2	C3	C5
2,5	37,2	39,7	16,7	48,0
3,0	44,4	46,8	19,7	57,0
3,5	51,5	54,0	23,0	66,1
4,0	58,6	61,4	26,3	75,5
4,6	65,6	68,6		
5,0	72,6	75,7		
5,5	79,5	82,8		
6,0	86,3	89,7		
6,5	93,2	96,6		
7,0	100,0	103,5		

Vaheväärtused võib interpoleerida sirgjooneliselt.

A12, 150x50 (Gävle)

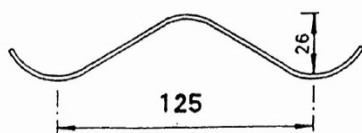


A2, 200x55

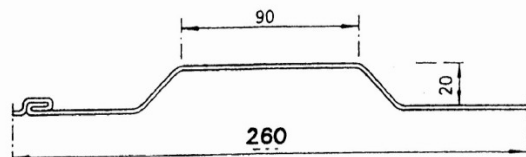


Joonis A1. Mitmekihilise lehtkonstruktsiooni gofreeringud (konstruktsioonitähis A).

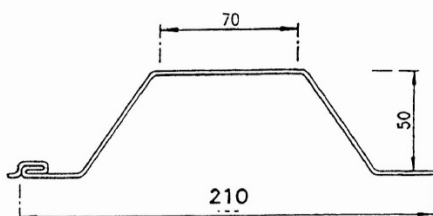
C3, 125x26



C3, 260x20/90

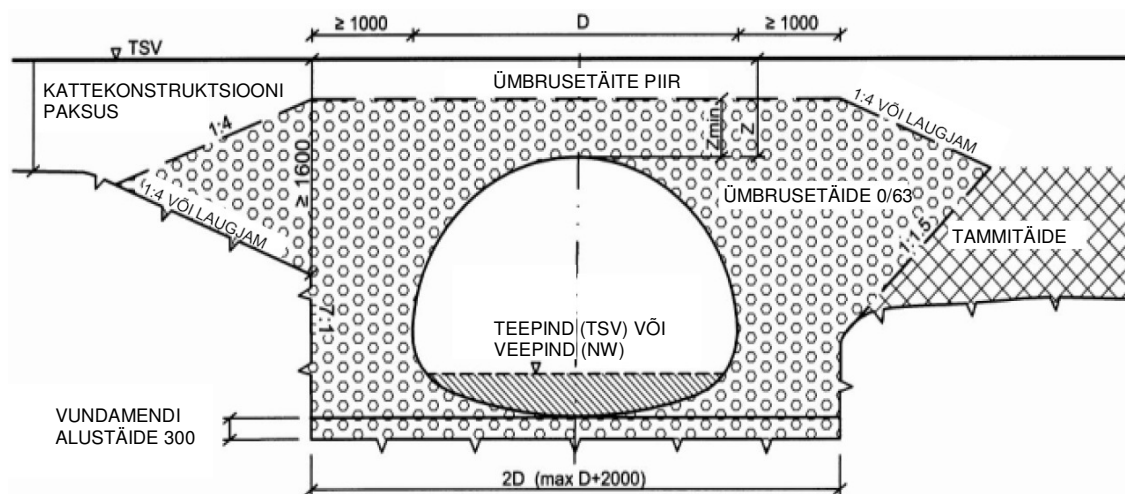


C5, 210x50/70

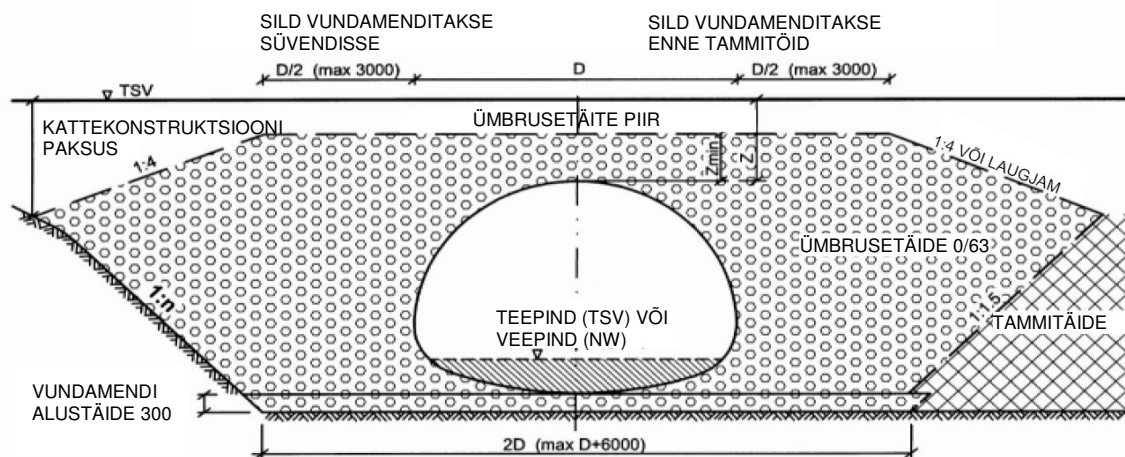


Joonis A2. Keerdõmblusega konstruktsiooni gofreeringud (konstruktsioonitähis C).

LISA B. VUNDAMENTIMISVIISIDE SUUNAVAD MUDELJOONISED


$$Z_{\min} = \text{MIN KATTESÜGAVUS} = 500 \text{ mm}$$

Joonis B1. Vundamentimisviis A. Toru vundamentimine kaljule.

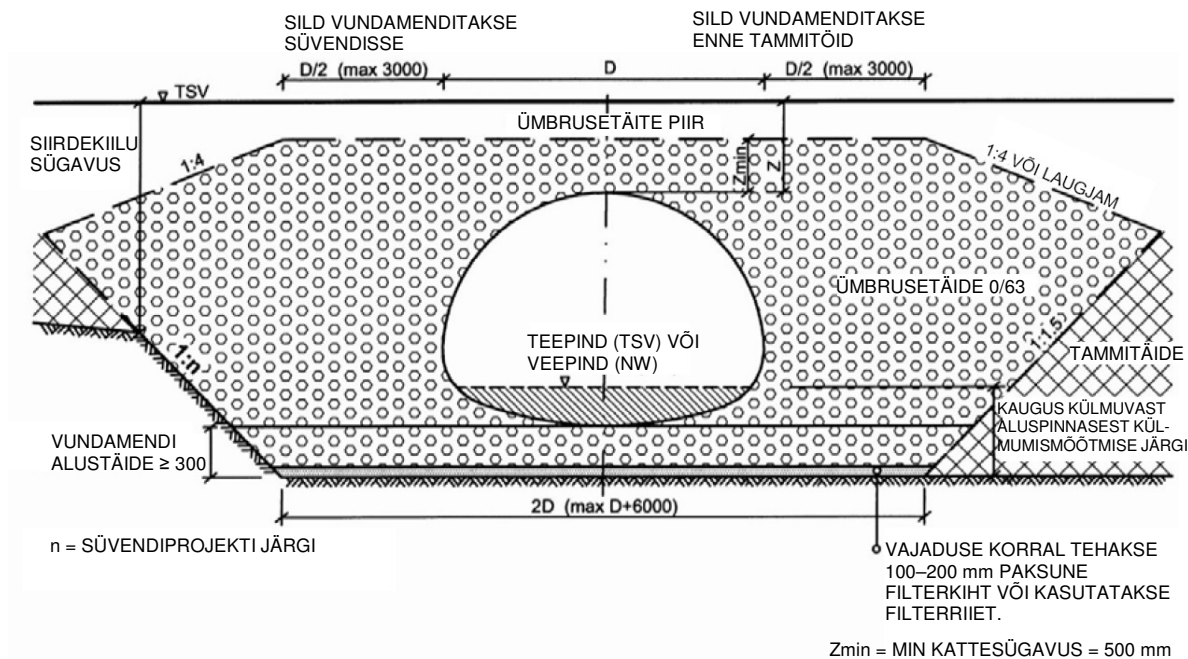


n = SÜVENDIPROJEKTI JÄRGI

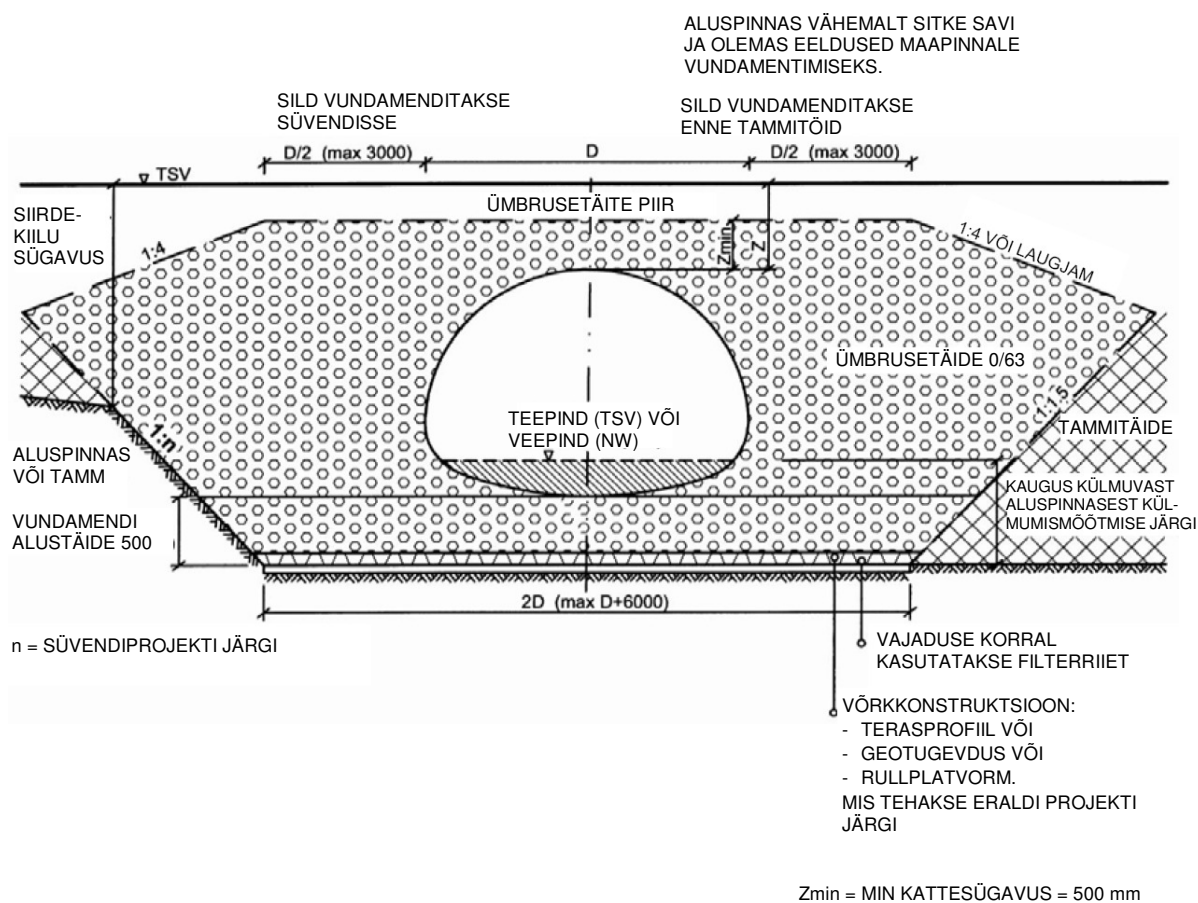
NB! KUI ALUSPINNAS VASTAB
VUNDAMENDI ALUSTÄITELE
ESITATUD NÕUDED, VÕIB TORU
VUNDAMENTIDA TIHENDATUD
ALUSPINNASELE.

$$Z_{\min} = \text{MIN KATTESÜGAVUS} = 500 \text{ mm}$$

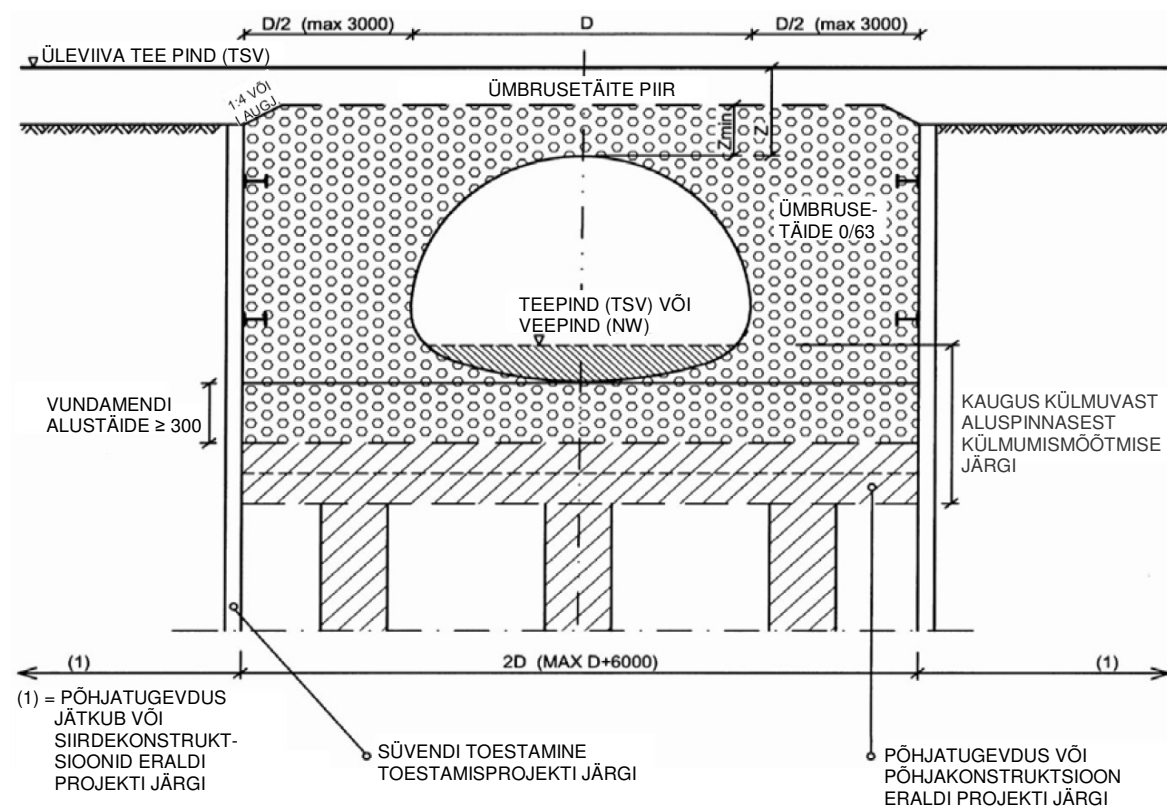
Joonis B2. Vundamentimisviis B. Toru vundamentimine külmumatule aluspinnasele või tammile.



Joonis B3. Vundamentimisviis C. Toru vundamentimine külmuvaale aluspinnasele.



Joonis B4. Vundamentimisviis D. Toru vundamentimine pehmele pinnale.



Joonis B5. Vundamentimisviis E. Toru vundamentimine toestatud süvendis.

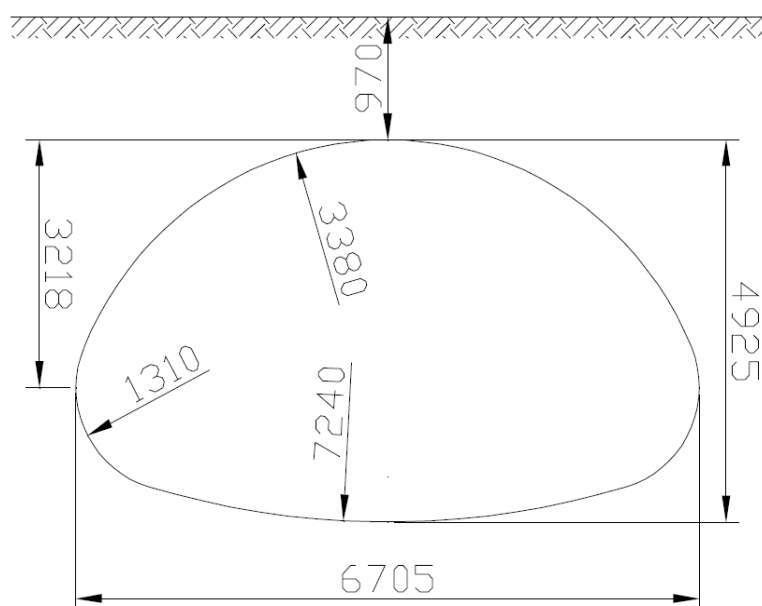
LISA C. MÕÖDISTUSNÄIDE

1 Mõõdistamise lähteandmed

Tabel C1. Näites kasutatud lähteandmed.

Arvutamiseks vajalikud lähteandmed	Näites
Paigalduskoht (tamm/süvend)	Süvend
Ümbrusetäide (kruus / purustatud kruus)	Kruus
Täitesügavus	970 mm
Toru ristlõige (ring/muu)	Muu
Toru laius	6705 mm
Toru lae kõrgus	3218 mm
Toru ülaosa raadius	3380 mm
Toru külje raadius	3380 mm
Lehepaksus	4,5 mm
Paindejäikus	71,1 mm ³ /mm
Inertsimoment	2083,4 mm ⁴ /mm
Ristlõikepindala	5,34 mm ² /mm
Terase tugevuse eriväärtus	275 MPa
Terase elastsustegur	210 GPa

Lisaks on lähteandmetena vajalikud koormusandmed. Selles näites on koormuseks liikluskoormus (Lk1). Koormus märgitakse ekvivalentse joonkoormusena. Lisaks tuleb arvesse võtta võimalikku samal ajal mõjuvat jaotunud koormust ja löögikoefitsiente.



Joonis C1. Näites kasutatud toru mõõtmed.

2 Jõusuurused

Koormus: (Lk1 koos löögikoefitsientidega)

$$p_{\text{trafik}} = 96.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2.1 Efektiivne kattesügavus

$$E_{jd} := \frac{E_j}{\gamma_{n,geo} \cdot \gamma_{m,E}}$$

$$E_{jd} = 32.786 \text{ MPa}$$

$$\lambda_f := \frac{E_{jd} \cdot D^3}{E_s \cdot I_y}$$

$$\lambda_f = 22588.8$$

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} := 0.013 \frac{\gamma_{m,kringf} \rho_l \cdot D^2}{E_j} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{2.8} \cdot 0.56 - 0.2 \cdot \ln \left(\frac{H}{D} \right) \cdot \lambda_f$$

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} = 43.642 \text{ mm}$$

$$h_{c,red} := h_c - \delta_{hj\ddot{a}ssa}$$

$$h_{c,red} = 0.926 \text{ m}$$

2.2 Normaaljõud

Normaaljõud pinnase kaalust

$$\phi_{kd} := \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi_k)}{\gamma_{n,geo} \cdot \gamma_{m,\phi}} \right)$$

$$\phi_{kd} = 33.873 \text{ deg}$$

$$S_v := \frac{0.8 \tan(\phi_{kd})}{\left(\sqrt{1 + \tan^2(\phi_{kd})} + 0.45 \tan(\phi_{kd}) \right)^2}$$

$$S_v = 0.237$$

$$\kappa := 2 \cdot S_v \cdot \frac{h_{c,red}}{D}$$

$$\kappa = 0.065$$

$$S_{ar.s\ddot{u}vend} := \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa}$$

$$S_{ar.s\ddot{u}vend} = 0.968$$

$$S_{ar} := \text{if}(\text{Paigaldus} = 2, 1, S_{ar.s\ddot{u}vend})$$

$$S_{ar} = 0.968$$

$$D_d := \text{if}(D > 1.05 \cdot 2 \cdot R_s, 2 \cdot R_s, D)$$

$$D_d = 6.705 \text{ m}$$

$$N_j := 0.2 \cdot \frac{H}{D_d} \cdot \gamma_{m,kringf} \rho_l \cdot D_d^2 + S_{ar} \cdot \left(0.9 \cdot \frac{h_{c,red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c,red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \gamma_{m,\ddot{o}verf} \rho_{\ddot{o}} \cdot D^2$$

$$N_j = 165.676 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Normaaljõud liikluskoormusest

$$N_t := \begin{cases} p_{\text{trafik}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } \left(\frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) \leq 0.25 \\ \left(1.25 - \frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) \cdot p_{\text{trafik}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) \leq 0.75 \\ 0.5 \cdot p_{\text{trafik}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c.\text{red}}}{D} \end{cases} \quad \left(\frac{h_{c.\text{red}}}{D}\right) = 0.138$$

$$N_t = 106.558 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Möödistatav normaaljõud

Kasutuspiirseisund:

$$N_{d.s} := \Psi \gamma_{\text{jord.s}} \cdot N_{j.\text{KRT}} + \Psi \gamma_{\text{trafik.s}} \cdot N_{t.\text{KRT}} \quad N_{d.s} = 271.594 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Piirseisund:

$$N_{d.u} := \Psi \gamma_{\text{jord.u.max}} \cdot N_j + \Psi \gamma_{\text{trafik.u}} \cdot N_t \quad N_{d.u} = 390.614 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Väsimuspiirseisund:

$$\Delta N_{d.f} := \Psi \gamma_{\text{trafik.f}} \cdot N_{t.\text{KRT}}$$

2.3 Paindemomentide määramine

Paindemoment pinnase kaalust

Abisuurused:

$$f_1 := \begin{cases} 0.67 + 0.87 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.2\right) & \text{if } 0.2 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.35 \\ 0.8 + 1.33 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.35\right) & \text{if } 0.35 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.5 \\ 2 \cdot \left(\frac{H}{D}\right) & \text{if } 0.5 < \left(\frac{H}{D}\right) \leq 0.6 \end{cases} \quad \left(\frac{H}{D}\right) = 0.48$$

$$f_1 = 0.973$$

$$f_{2.\text{kringf}} := \begin{cases} 0.0046 - 0.0010 \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \\ 0.0009 & \text{if } \lambda_f > 5000 \end{cases} \quad f_{2.\text{kringf}} = 9 \times 10^{-4}$$

$$f_{2.\text{överf}} := \begin{cases} 0.018 - 0.004 \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \\ 0.0032 & \text{if } \lambda_f > 5000 \end{cases} \quad f_{2.\text{överf}} = 3.2 \times 10^{-3}$$

$$f_3 := 6.67 \cdot \frac{H}{D} - 1.33 \quad f_3 = 1.871$$

$$M_{j.alku} := \gamma_{m.kringf} \rho_l \cdot D^3 \cdot (-f_1 \cdot f_3 \cdot f_2.kringf) \quad M_{j.alku} = -9.877 \frac{kNm}{m}$$

$$M_j := \gamma_{m.kringf} \rho_l \cdot D^3 \cdot \left[-f_1 \cdot f_3 \cdot f_2.kringf + S_{ar} \cdot \frac{\gamma_{m.överf} \rho_{\ddot{o}}}{\gamma_{m.kringf} \rho_l} \cdot \frac{h_{c.red}}{D} \cdot \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} \cdot f_1 \cdot f_2.överf \right]$$

$$M_j = -7.367 \frac{kNm}{m}$$

Paindemoment liikluskoormusest

Abisuurused:

$$f_{4i} := (1 - 0.2 \cdot \log(\lambda_f)) \quad f_{4i} = 0.129$$

$$f_{4ii} := \begin{cases} 0.120(1 - 0.15 \log(\lambda_f)) & \text{if } \lambda_f \leq 100000 \\ 0.030 & \text{if } \lambda_f > 100000 \end{cases} \quad f_{4ii} = 0.042$$

$$f_{4iii} := \frac{0.3494 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right)^6 - 2.405 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right)^5 + 6.705 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right)^4 - 9.7382 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right)^3 + 7.8598 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right)^2 - 3.4532 \left(\frac{h_{c.red}}{D} \right) + 0.7502}{0.26}$$

$$f_{4iii} = 1.538$$

(Skeemi ei ole täielikult näha)

$$f_{4iv} := \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.25} \quad f_{4iv} = 1$$

$$M_t := f_{4i} \cdot f_{4iii} \cdot f_{4ii} \cdot f_{4iv} \cdot D \cdot p_{trafik} + S_{ar} \cdot \left(\frac{R_t}{R_s} \right)^{0.75} \cdot f_1 \cdot f_2.överf \cdot q_l \cdot D^2$$

$$M_t = 5.758 \frac{kNm}{m}$$

Möödistatav paindemoment toru laes

Kasutuspiirseisund

$$M_{td.s.max} := \Psi \gamma_{trafik.s} \cdot M_{t.KRT} \quad M_{td.s.min} := \Psi \gamma_{trafik.s} \cdot \left(\frac{-M_{t.KRT}}{2} \right)$$

$$M_{d.s.max} := \Psi \gamma_{jord.s} \cdot M_{j.KRT} + M_{td.s.max} \quad M_{d.s.min} := \Psi \gamma_{jord.s} \cdot M_{j.KRT} + M_{td.s.min}$$

$$M_{d.s.max} = -2.58 \frac{kNm}{m} \quad M_{d.s.min} = -9.76 \frac{kNm}{m}$$

$$M_{d.s} = -9.76 \frac{kNm}{m}$$

Piirseisund

Lõplik olukord:

$$M_{d,u,loppu} := \Psi \gamma_{jord,u} \cdot M_j + \Psi \gamma_{trafik,u} \cdot M_t$$

$$M_{d,u,loppu} = 3.735 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$M_{d,u} = -11.852 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Tööaegne olukord:

$$M_{d,u,alku} := \Psi \gamma_{jord,u,max} M_{j,alku}$$

$$M_{d,u,alku} = -11.852 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

Väsimuspiirseisund

$$\Delta M_{d,f} := 1.5 \Psi \gamma_{trafik,f} |M_{t,KRT}|$$

$$\Delta M_{d,f} = 1.909 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

3 Mõõdistamine

3.1 Väikseimad lubatud mõõtmed

Kattesügavus

$$h_{c,red} \geq 0.5\text{m}$$

$$h_{c,red} = 0.926\text{m}$$

Toru ristlõige

$$D \geq 2.0\text{m}$$

$$D = 6.705\text{m}$$

$$100 \leq \lambda_f \leq 100000$$

$$\lambda_f = 22588.813$$

Täited

$$a_1 > 0.2\text{m}$$

$$a_1 = 0.5\text{m}$$

$$a_2 > 0.3\text{m}$$

$$a_2 = 0.5\text{m}$$

$$a_3 \geq \min\left(3.0\text{m}, \frac{D}{2}\right)$$

$$a_3 = 3\text{m}$$

$$a_4 \geq 0.5\text{m}$$

$$a_4 = 0.6\text{m}$$

3.2 Liikluskoormustest tekkiv lubatud paine

$$f_{4i} f_{4iii} < 1.0$$

$$f_{4i} f_{4iii} = 0.199$$

3.3 Torusilla mõõdistamine kasutuspiirseisundis / toru ülaosa

$$f_{yd.s} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{n.s.st\grave{a}l}}$$

$$f_{yd.s} = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{N_{d.s}}{A_y} + \frac{|M|}{W_y} \geq f_{yd.s}$$

$$\frac{N_{d.s}}{A_y} + \frac{|M_{d.s}|}{W_y} = 188.135 \text{ MPa}$$

3.4 Torusilla mõõdistamine piirseisundis / toru ülaosa

Abisuurused:

$$\kappa_2 := \frac{h_{c.red}}{R_t}$$

$$\kappa_2 = 0.274$$

$$\xi_N := \begin{cases} \sqrt{\kappa_2} & \text{if } \sqrt{\kappa_2} \leq 1.0 \\ 1 & \text{if } \sqrt{\kappa_2} > 1.0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Ainult normaaljõud} \\ \text{Normaaljõud + moment} \end{array} \quad \begin{array}{l} \xi_N = 0.524 \\ \xi_{NM} := 1.0 \end{array}$$

$$\eta_j := 1 - \left(\frac{1}{1 + \kappa_2} \right)^2$$

$$\eta_j = 0.384$$

$$\mu := \left[1.22 + 1.95 \left(\frac{E_s \cdot I_y}{\eta_j \cdot E_j \cdot R_t^3} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}}$$

$$\mu = 3.825$$

$$N_{cr.el} := \frac{3\xi_N}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_j \cdot E_s \cdot I_y}{R_t}}$$

$$N_{cr.el} = 945.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{cr.el.NM} = 1806.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$f_{yd.u} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{n.u.st\grave{a}l}}$$

$$f_{yd.u} = 250 \text{ MPa}$$

$$N_u := f_{yd.u} \cdot A_y$$

$$N_u = 1335 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{cr} := \begin{cases} N_{cr.el} & \text{if } \left(\frac{N_{cr.el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ N_u \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr.el}} \right) & \text{if } \left(\frac{N_{cr.el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$\frac{N_{cr.el}}{N_u} = 0.708$$

$$N_{cr} = 863.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{cr.NM} = 1088.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\omega := \begin{cases} \frac{N_{cr}}{N_u} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el}} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$\omega = 0.647$$

$$\omega_{NM} = 0.815$$

$Z :=$ „Plastiline paindejäikus”

$$\eta := \frac{Z}{W}$$

$$\eta := 1.35$$

$$\alpha_c := \begin{cases} \eta^2 \cdot \omega & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega) \geq 0.8 \\ 0.8 & \text{if } (\eta^2 \cdot \omega) < 0.8 \end{cases}$$

$$\eta^2 \cdot \omega = 1.179$$

$$\alpha_c = 1.179$$

$$\eta^2 \cdot \omega_{NM} = 1.486$$

$$\alpha_{c,NM} = 1.486$$

$$M_u := 1.35 W_y \cdot f_{yd,u}$$

$$M_u = 23.996 \text{ kN}$$

Ühendatud koormuste kontroll

Normaaljõu kontroll

$$\beta_{NM} \leq 1.0$$

$$\beta_N \leq 1.0$$

$$\beta_{NM} := \left(\frac{N_{d,u}}{\omega_{NM} \cdot f_{yd,u} \cdot A_y} \right)^{\alpha_{c,NM}} + \frac{|M_{d,u}|}{M_u}$$

$$\beta_N := \left(\frac{N_{d,u}}{\omega \cdot f_{yd,u} \cdot A_y} \right)^{\alpha_c}$$

$$\beta_{NM} = 0.712$$

$$\beta_N = 0.392$$

3.5 Torusilla mõõdistamine piirseisundis / toru alaosa

$$\xi_a := 1 \quad \mu_a := 1.22$$

$$N_{cr,el,a} := \frac{3\xi_a}{\mu_a} \cdot \sqrt{\frac{E_j \cdot E_s \cdot I_a}{R_b}}$$

$$N_{cr,el,a} = 3869.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{u,a} := f_{yd,u} \cdot A_a$$

$$N_{u,a} = 1335 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{cr,a} := \begin{cases} N_{cr,el,a} & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} \right) \leq 0.5 \\ N_{u,a} \cdot \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_{u,a}}{N_{cr,el,a}} \right) & \text{if } \left(\frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} \right) > 0.5 \end{cases}$$

$$\frac{N_{cr,el,a}}{N_{u,a}} = 2.899$$

$$N_{cr,a} = 1219.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d,u} \leq N_{cr,a}$$

3.6 Poltliite mõõdistamine

Poldid M20 Tugevus 8,8

$$d_b := 20\text{mm}$$

$$f_{bk} := 800\text{MPa}$$

Poltide arv (tk/m):

$$n_b := 10 \cdot \frac{1}{m}$$

Poldi efektiivne ristlõikeala:

$$A_{\text{eff}} := 0.78 \pi \cdot \frac{d_b^2}{4} \quad A_{\text{eff}} = 245.044\text{mm}^2$$

Poldi pea läbimõõt:

$$D_b := 34\text{mm}$$

3.6.1 Mõõdistamine piirseisundis

$$f_{bd} := 0.8f_{bk}$$

$$f_{bd} = 640\text{MPa}$$

Poldi tõmbetugevuse arvutusväärtus:

$$f_{\text{Rtd}} := 0.85 \cdot 0.8 \cdot \frac{f_{bd}}{\gamma_{\text{n.u.stål}}}$$

$$f_{\text{Rtd}} = 395.636\text{MPa}$$

Poldi nihketugevuse arvutusväärtus:

$$f_{\text{Rvd}} := 0.85 \cdot 0.6 \cdot \frac{f_{bd}}{\gamma_{\text{n.u.stål}}}$$

$$f_{\text{Rvd}} = 296.727\text{MPa}$$

Poldi nihkejõutaluvus

$$F_{\text{Rv}} := 0.9 \cdot n_b \cdot f_{\text{Rvd}} \cdot A_{\text{eff}}$$

$$F_{\text{Rv}} = 654.402 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{\text{d.u}} < F_{\text{Rv}}$$

$$N_{\text{d.u}} = 390.614 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Poldi varresuunaline tõmbejõutaluvus

Poldi murdumine

$$F_{\text{Rtl}} := \frac{n_b}{2} \cdot f_{\text{Rtd}} \cdot A_{\text{eff}}$$

$$F_{\text{Rtl}} = 484.742 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Poldi pea läbilõikumine

$$F_{\text{Rp}} := 0.6 \cdot \frac{n_b}{2} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{\text{n.u.stål}}} \cdot t_y \cdot \pi \cdot D_b$$

$$F_{\text{Rp}} = 360.498 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{\text{Rt}} := \min(F_{\text{Rtl}}, F_{\text{Rp}})$$

$$F_{\text{Rt}} = 360.498 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Poltide kaugus laine suunas:

$$e_2 := 85\text{mm}$$

Toru laes: $F_{top} := \frac{|M_{d,u}|}{e_2} \quad F_{top} = 139.439 \frac{kN}{m}$

$F_{Rt} \geq F_{top}$

Servapinge ja servarebenemise taluvus

$f_{d2} := 0.9 \cdot \min\left(\frac{f_{bd}}{\gamma_{n.u.st\aal}}, \frac{f_{yk}}{\gamma_{n.u.st\aal}}\right) \quad e_1 := 60mm \quad f_{d2} = 225MPa$

$k_2 := \frac{e_1}{d_b} - 0.5 \quad k_2 = 2.5 \quad d_{eff} := \sqrt{\frac{4A_{eff}}{\pi}}$

$F_{Rh1} := n_b \cdot k_2 \cdot d_{eff} \cdot t_y \cdot f_{d2} \quad F_{Rh1} = 447.108 \frac{kN}{m} \quad d_{eff} = 17.664mm$

$F_{Rh} := \begin{cases} F_{Rh1} & \text{if } \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} > 1.25 \\ \frac{F_{Rv}}{1.25} & \text{if } \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} \leq 1.25 \end{cases} \quad \frac{F_{Rv}}{F_{Rh1}} = 1.464 \quad F_{Rh} = 447.108 \frac{kN}{m}$

$F_{Rh} \geq N_{d,u} \quad N_{d,u} = 390.614 \frac{kN}{m}$

Poldi ühendatud tõmbe- ja nihkejõutaluvus

Toru laes: $\left(\frac{F_{top}}{F_{Rt}}\right)^2 + \left(\frac{N_{d,u}}{F_{Rv}}\right)^2 = 0.506$

3.6.2 Mõõdistamine väsimuspiirseisundis

Poldi nihkejõutaluvus $\Delta f_{d,v} = 24MPa$

$\Delta \sigma_{ekv,v} \leq \Delta f_{d,v}$

$\Delta \sigma_{ekv,v} := \Psi \gamma_{trafik.f} \frac{N_{t.KRT}}{n_b \cdot A_{eff}} \quad \Delta \sigma_{ekv,v} = 11.563MPa$

Poldi varresuunaline tõmbejõutaluvus $\Delta f_{d,t} = 39MPa$

$\Delta \sigma_{ekv,t} \leq \Delta f_{d,t}$

Toru laes: $\Delta \sigma_{ekv,t.top} := \Psi \gamma_{trafik.f} \frac{M_{t.KRT}}{e_2} \cdot \frac{2}{n_b \cdot A_{eff}}$

$\Delta \sigma_{ekv,t.top} = 12.221MPa$

Poldi ühendatud nihke- ja tõmbejäõutaluvus

$$\Delta\sigma_{ekv} \leq 1.0$$

$$\text{Toru laes: } \Delta\sigma_{ekv.top} := 0.9 \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma_{ekv.v}}{\Delta f_{d.v}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma_{ekv.t.top}}{\Delta f_{d.t}}\right)^2}$$

$$\Delta\sigma_{ekv.top} = 0.51$$

3.7 Paigaldusaegne jäikus

$$Piir = 0.2 \frac{m}{kN}$$

$$\frac{D^2}{E_s \cdot I_y} = 0.103 \frac{m}{kN}$$

$$\frac{D^2}{E_s \cdot I_y} < Piir$$

3.8 Torusilla väsimusmõõdistus

$$\frac{\Delta N_{d.f}}{A_y} + \frac{\Delta M}{W_y} \leq \Delta f_{d.r} \quad \Delta f_{d.r} = 94 \text{ MPa}$$

Normaaljõu põhjustatud pinge üla- ja alapinnal sama

$$\sigma_N := \frac{\Delta N_{d.f}}{A_y} \quad \sigma_N = 5.306 \text{ MPa}$$

Momendi põhjustatud pinge, kui koorem on toru keskel

$$\sigma_{M.y1}(\Delta M) := \frac{\frac{\Delta M}{1.5}}{W_y} \quad \sigma_{M.y1}(\Delta M_{d.f}) = 17.90 \text{ MPa}$$

Momendi põhjustatud pinge, kui koorem on toru servas

$$\sigma_{M.ap}(\Delta M) := 0.5 \frac{\frac{\Delta M}{1.5}}{W_y} \quad \sigma_{M.ap}(\Delta M_{d.f}) = 8.95 \text{ MPa}$$

Suurim ja väikseim pinge profiili sisepinnal

$$\sigma_{NM.y1}(\Delta M) := -\sigma_N - \sigma_{M.ap}(\Delta M) \quad \sigma_{NM.y1}(\Delta M_{d.f}) = -14.256 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{NM.y2}(\Delta M) := -\sigma_N + \sigma_{M.y1}(\Delta M) \quad \sigma_{NM.y2}(\Delta M_{d.f}) = 12.595 \text{ MPa}$$

Pingekõikumine profiili sisepinnal (sama mis välispinnal)

$$\sigma_{rd}(\Delta M) := |\sigma_{NM.y1}(\Delta M)| + |\sigma_{NM.y2}(\Delta M)|$$

$$\sigma_{rd}(\Delta M_{d.f}) = 26.85 \text{ MPa}$$

