

Ville Vuorio

# MUOVI- JA KOMPOSIITTIPUTKISILTO- JEN MITOITUSMENETELMÄT

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: professori Anssi Laaksonen  
Tarkastaja: DI Olli Asp  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Ville Vuorio: Muovi- ja komposiittiputkisiltojen mitoitusmenetelmät  
Diplomityö, 82 sivua, 19 liitesivua  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2021

---

Suomessa putkisillat suunnitellaan ja toteutetaan Väyläviraston ohjeiden mukaisesti. Nykyiset ohjeet mahdollistavat vain teräputkisiltojen käytön putkisiltoina. Muovi- ja komposiittiputkisilloille ei ole aikaisempaa Väyläviraston ohjeistusta. Väyläviraston ja putkitoimittajien yhteisen tahtotilan myötä muodostui tarve uudelle suunnitteluohjeelle.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on toimia Väyläviraston uuden muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeen laadinnan taustadokumenttina. Tavoitteena on selvittää, voidaanko molempia CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mitoitusmenetelmiä käyttää vaihtoehtoisina mitoitusapoina suunnitteluohjeessa ja, jos voidaan, niin kumman tulisi olla ohjeen pääasiallinen menetelmä ja kumman vaihtoehtoinen. Lisäksi tavoitteena on selvittää, millaisia mitoitusvalintoja menetelmissä tulee noudattaa, jotta niiden tulokset ovat tarkoituksen mukaisesti yhdenmukaiset.

Tässä tutkimuksessa kuvataan suunnitteluohjeeseen valittujen mitoitusmenetelmien periaatteet ja niiden väliset eroavaisuudet. Lisäksi suoritetaan vertailulaskelmia, joiden avulla voidaan todeta menetelmien välisten erojen vaikutukset mitoituksen lopputuloksiin ja määritellä tarvittavat mitoitusvalinnat tulosten yhdenmukaistamiseksi. Lopuksi määritellään suunnitteluohjeeseen suositeltavat mitoituskäytännöt vertailulaskelmien perustella.

Tutkimuksen tuloksena todetaan, että CEN/TR 1295-3 mukaista mitoitusmenetelmää voidaan käyttää tulevassa Väyläviraston muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeessa pääasiallisena mitoitusmenetelmänä ja ATV-127 mukainen menetelmä voidaan hyväksyä vaihtoehtoisena menetelmänä, jolla saadaan laskennaltaan monimutkaisempaan CEN/TR 1295-3 menetelmään nähden varmalla puolella olevat laskentatulokset.

Avainsanat: putkisilta, muoviputki, komposiittiputki, mitoitusmenetelmä

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Ville Vuorio: Structural design methods for plastic and composite pipe bridges  
Master of Science Thesis, 82 pages, 19 Appendix pages  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Civil Engineering  
May 2021

---

In Finland, pipe bridges are designed and constructed in accordance with the Finnish Transport Infrastructure Agency's instructions and guidelines. The current guidelines only allow the use of soil steel composite bridges as pipe bridges. There are no previous Finnish Transport Infrastructure Agency's guidelines for plastic and composite pipe bridges. With this mutual need the Finnish Transport Infrastructure Agency and the pipe suppliers set out to draft a new design manual for plastic and composite pipe bridges.

The aim of this study is to serve as a background document for the preparation of the Finnish Transport Infrastructure Agency's new design guidelines for plastic and composite pipe bridges. The aim is to find out whether the CEN/TR 1295-3 and ATV-127 design methods can be used in parallel in the design manual and what the relationship and hierarchy between them should be. In addition, the aim is to find out what design choices must be made in the methods so that their results are consistent between each other.

This study describes the principles of the design methods selected for the design guide and the differences between them. In addition, comparative calculations are performed to determine the effects of the differences between the methods on the design results and to determine the necessary design choices needed to harmonize the results. Finally, the recommended design practices are defined for the design guide based on the comparative calculations.

As a result of the study, it is stated that the design method according to CEN/TR 1295-3 can be used as the main design method in the future design guide for plastic and composite pipe bridges and the method according to ATV-127 can be accepted as an alternative method to the more complex CEN/TR 1295-3 method.

Keywords: pipe bridge, plastic pipe, composite pipe, design method

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu toimimaan taustadokumenttina Väyläviraston uudelle muovija komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeelle. Työn tilasivat ja rahoittivat Väylävirasto, Uponor Infra Oy, Renos Oy ja Intendo Oy.

Haluan kiittää kaikkia tulevan suunnitteluohjeen laadintaan liittyvän työryhmän jäseniä. Erityisesti haluan osoittaa kiitokseni Jani Meriläiselle (Väylävirasto), Mikko Peltomaalle (Väylävirasto), Anders Andtbackalle (Uponor Infra Oy), Seppo Rautiaiselle (Uponor Infra Oy), Sami Leväselle (Renos Oy) ja Aki Litokorvelle (Intendo Oy) arvokkaista neuvoista ja asiantuntemuksesta tämän työn aikana.

Lisäksi haluan kiittää Jarmo Niemeä (Suunnittelukide Oy) tämän diplomityön mahdollistamisesta sekä samalla kaikesta saamastani tuesta ja ohjauksesta urani aikana.

Haluan myös lausua kiitokseni diplomityöni tarkastamisesta professori Anssi Laakso-selle ja DI Olli Aspille Tampereen Yliopistosta.

Tampereella, 20.5.2021

Ville Vuorio



# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Lähtökohdat .....	1
1.2 Tavoitteet .....	1
2. NYKYTILANNE .....	2
2.1 Putkisillat Suomessa .....	2
2.2 Putkisiltojen mitoitus .....	4
3. TARKASTELTAVAT MITOITUSMENETELMÄT .....	6
3.1 Yleistä .....	6
3.2 Putken tiedot .....	6
3.3 Liikenteen aiheuttamat kuormitukset .....	7
3.4 Ympäristäytöt .....	11
3.5 Ympäristäyttöjen tiivistysluokat .....	12
3.6 Ympäristäytön tiedot .....	14
3.7 Siiloteoria .....	16
3.8 Mitoituksen kulku ja kelpoisuuden toteaminen .....	17
3.9 Kuormien jakautuminen .....	18
3.10 Putkeen kohdistuvat kuormitukset .....	22
3.11 Putken voimasuureet, jännitykset ja venymät .....	24
3.12 Putken taipumat .....	26
3.13 Putken seinämän nurjahdus .....	27
4. VERTAILULASKENTA .....	29
4.1 Periaatteet .....	29
4.2 Putkien tiedot .....	29
4.3 Liikennekuormat .....	30
4.4 Maaparametrit .....	33
4.5 Tiivistysluokan vaikutus .....	36
4.6 Siiloteorian vaikutus .....	40
4.7 Päällysteiden jäykkyyden vaikutus .....	43
4.8 Momentit ja normaalivoimat .....	48
4.9 Käyttöasteiden vertailu venymien suhteen .....	51
4.10 Pystysuuntaisten taipumien vertailu .....	55
5. MITOITUSPERIAATTEET SUUNNITTELUOHJETTA VARTEN .....	63
5.1 Yleistä .....	63
5.2 Liikennekuormat .....	64
5.3 Staattinen mitoitus .....	70

5.4	Väsymismitoitus .....	72
5.5	Nosteen vaikutukset.....	77
6.	YHTEENVETO.....	78
6.1	Vertailulaskelmien tulokset.....	78
6.2	Suunnitteluohjeen mitoituspriatteen tiivistelmä .....	78
6.3	Jatkotutkimusaiheita.....	79
	LÄHTEET .....	81
	LIITE A: MITOITUSESIMERKIT .....	83

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

<b>CEN/TR 1295-3</b>	mitoitusmenetelmä lähdeluettelomerkinnän [15] mukaisesti
<b>ATV-127</b>	mitoitusmenetelmä lähdeluettelomerkinnän [4] mukaisesti
ET1...4	CEN/TR 1295-3 mukaiset ympäristäytöluokitukset
I1...3	CEN/TR 1295-3 mukaiset asennusluokitukset
A1...4	ATV-127 mukaiset luokitukset (ympäristäyttö)
B1...4	ATV-127 mukaiset luokitukset (perustaminen)
LM1, LM2, LM3 LM71-35	ajoneuvoliikenteen kuormakaaviot rataliikenteen kuormakaavio
A	putken profiilin pinta-ala
$b_e$	putkiprofiilin seinämän tehollinen mitta nurkka-alueiden välillä
$C_{ij}$	pysty- ja vaakasuuntaiset muodonmuutoskertoimet
$C_{ci}$ ja $C_{co}$	jännitysten korjauskertoimet seinämän sisä- ja ulkopinnoissa
D	putken keskimääräinen halkaisija
$D_{Pr}$	maan tiiveysaste parannetulla Proctor-kokeella
$D_{T,mod}$	päällysteen jäykkyyden ja kuormien jakamiskyvyn kerroin
$E_P$	putken laskennallinen kimmomoduuli
$E_{sd}$	maan laskennallinen kimmomoduuli (tangenttimoduuli)
$f_c$ ja $f_{R,TW}$	maan kimmomoduulin redusointikertoimet (kaivannon leveys)
$f_{R,T}$	maan kimmomoduulin redusointikerroin (pitkäaikaisominaisuudet)
$F_{S,R}$	kokonaisvarmuusluku putken kestävyys suhteen
$F_{S,I}$	kokonaisvarmuusluku putken stabiiliteetin suhteen
$F_{S,F}$	kokonaisvarmuusluku putken väsymiskestävyys suhteen
h	peitesyvyys
I	putken profiilin neliömomentti
k	putkiprofiilin seinämälevyn nurjahduskerroin
$K_1$	pysty- ja vaakasuuntaisen kuorman suhde täytössä putken päällä
$K_2$	pysty- ja vaakasuuntaisen kuorman suhde täytössä putken sivuilla
$K_{io}$	apukerroin putkeen muodostuvia alkumuodonmuutoksia varten
$M_i$	putken seinämään kohdistuva taivutusmomentti
$m_i$	taivutusmomenttien muuntokertoimet
$N_i$	putken seinämään kohdistuva normaalivoima
$n_i$	normaalivoimien muuntokertoimet
p	LM71-35 kuormakaavion nauhakuorma ratapölkyille jaettuna
p'	LM71-35 kuormakaavion pistekuormat ratapölkyille jaettuna
$q_v$	pystysuuntainen kuorma putken laella
$q_h$	vaakasuuntainen maanpaineakuorma putken sivuilla
$q_{h,d}$	vaakasuuntainen maanpaineakuorma putken sivuilla
$q_h^*$	vaakasuuntainen ympäristäytön tukireaktion maanpaineakuorma
r	putken keskimääräinen säde
$S_{Bv}$	ympäristäytön pystysuuntainen jäykkyystermi
$S_{Bh}$	ympäristäytön vaakasuuntainen jäykkyystermi
$S_P$	putken rengasjäykkyys
t	putken seinämän paksuus
$V_S$	ympäristäytön kokonaisjäykkyystermi
$V_{PS}$	ympäristäytön ja putken yhteisjäykkyystermi
W	putken profiilin taivutusvastus
w	putken profiilin seinämän kokonaismitta nurkka-alueiden välillä

$\alpha_v$	putken alapintaan maasta muodostuvan tuentakulman suuruus
$\alpha_h$	putken sivuun maasta muodostuvan tuentakulman suuruus
$\beta$	kaivannon reunojen kaltevuuskulma
$\gamma_P$	putken tilavuuspaino
$\gamma_S$	maan kuivatilavuuspaino
$\gamma_{S,w}$	maan märkätilavuuspaino
$\delta$	ympäristäytön ja putken seinämän välinen kitkakulma
$\Delta d_{frac}/d_m$	putken suhteellinen murtovenymä
$\epsilon_i$	putkiprofiilin venymät seinämän sisä- ja ulkopinnoissa
$\epsilon_{yc}$	putkimateriaalin myötöpuristuman arvo
$\Phi_i$	maan sisäinen kitkakulma
$K_\beta$	siiloteorian kerroin ympäristäytölle kaivannon kaltevuudessa $\beta$
$K_{90}$	siiloteorian kerroin ympäristäytölle pystysuorassa kaivannossa
$K_{a\beta}$	siiloteorian kerroin pintakuormalle kaivannon kaltevuudessa $\beta$
$K_{a,90}$	siiloteorian kerroin pintakuormalle pystysuorassa kaivannossa
$K$	siiloteorian kerroin ympäristäytölle kaivannon kaltevuudessa $\beta$
$K_\beta$	siiloteorian kerroin ympäristäytölle pystysuorassa kaivannossa
$K_o$	siiloteorian kerroin pintakuormalle kaivannon kaltevuudessa $\beta$
$K_{o\beta}$	siiloteorian kerroin pintakuormalle pystysuorassa kaivannossa
$\lambda$	hoikkuuskerroin (seinämän lommahduslaskennassa)
$\lambda_i$	kuormien jakautumiskertoimet
$\lambda_{PT}$	kuormien jakautumiskertoimet putkelle
$\lambda_S$	kuormien jakautumiskertoimet ympäristäytölle
$\rho$	tehollisen mitan kerroin (seinämän lommahduslaskennassa)
$\sigma_i$	putkiprofiilin jännitykset seinämän sisä- ja ulkopinnoissa
$\sigma_z$ ja $\sigma_v$	liikennekuormien jännitykset putken laella (Boussinesq)
$\omega$	kotelorakenteen profiilin toistuvuuden välimatka

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Lähtökohdat

Suomessa putkisillat suunnitellaan ja toteutetaan Väyläviraston ohjeiden mukaisesti. Nykyiset ohjeet mahdollistavat vain teräputkisiltojen käytön putkisiltoina. Muovi- ja komposiittiputkisilloille ei ole aikaisempaa Väyläviraston ohjeistusta. Väyläviraston ja putkitoimittajien yhteisen tahtotilan myötä muodostui tarve uudelle suunnitteluohjeelle.

Uuden suunnitteluohjeen laatimiseksi perustettiin työryhmä, johon kuului muun muassa Väyläviraston silta-asiantuntijoita ja muovi- ja komposiittiputkitoimittajia. Suunnitteluohjeessa käytettäväksi mitoitustapojen valikoituivat CEN/TR 1295-3 [15] ja ATV-127 [4] lukuisten vaihtoehtojen joukosta. Valinta tehtiin työryhmän jäsenten kokemusten perusteella. Monimutkaisempi CEN/TR 1295-3 [15] mitoitustapa perustuu ATV-127 [4] menetelmään ja tarkoituksena oli mahdollistaa molempien menetelmien käyttäminen suunnitteluohjeessa. Tämä tutkimus laadittiin osana työryhmän ohjeenlaadintaprojektia.

## 1.2 Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on toimia Väyläviraston uuden muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeen laadinnan taustadokumenttina. Tavoitteena on selvittää, voidaanko molempia mitoitustapoja CEN/TR 1295-3 [15] ja ATV-127 [4] käyttää suunnitteluohjeessa rinnakkain ja millaisen niiden välisen suhteen tulisi ohjeessa olla. Lisäksi tavoitteena on selvittää, millaisia mitoitustapojen valintoja menetelmissä tulee noudattaa, jotta niiden tulokset ovat tarkoituksen mukaisesti yhdenmukaiset.

Tässä tutkimuksessa kuvataan suunnitteluohjeeseen valittujen mitoitustapojen periaatteet ja niiden väliset eroavaisuudet. Lisäksi suoritetaan vertailulaskelmia, joiden avulla voidaan todeta menetelmien välisten erojen vaikutukset mitoituksen lopputuloksiin ja määrittellä tarvittavat mitoitustapojen valinnat tulosten yhdenmukaistamiseksi. Lopuksi määritellään suunnitteluohjeeseen suositeltavat mitoitustapojen käytännöt vertailulaskelmien perusteella.

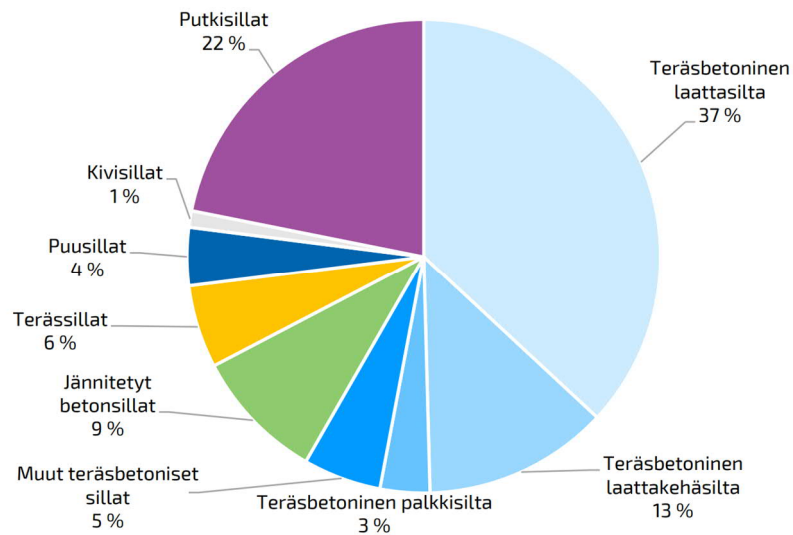
Tutkimus on rajattu menetelmien väliseen vertailuun ja menetelmien tulosten yhdenmukaistamiseen suunnitteluohjetta varten. Tutkimuksessa oletetaan, että tarkasteltavien menetelmien mukaiset mitoitustavat vastaavat tuloksiltaan todellisuutta ja niiden taustalla olevat mitoitustapojen periaatteet ja teoriat ovat oikein.

## 2. NYKYTILANNE

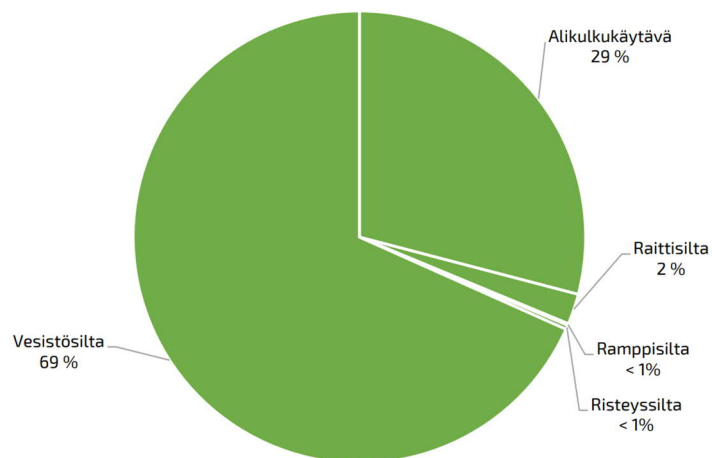
### 2.1 Putkisillat Suomessa

Suomessa on 3 295 rekisteröityä tieliikenteen putkisiltaa, joista 69 % on vesistösiltoja. Tieliikenteen putkisilloista 179 kappaletta luokitellaan Väyläviraston kuntoluokitusten perustella huonokuntoisiksi (kuntoluokitukset 1 tai 2). Vuonna 2019 valmistui 37 kappaletta uusia tieliikenteen putkisiltoja. [24]

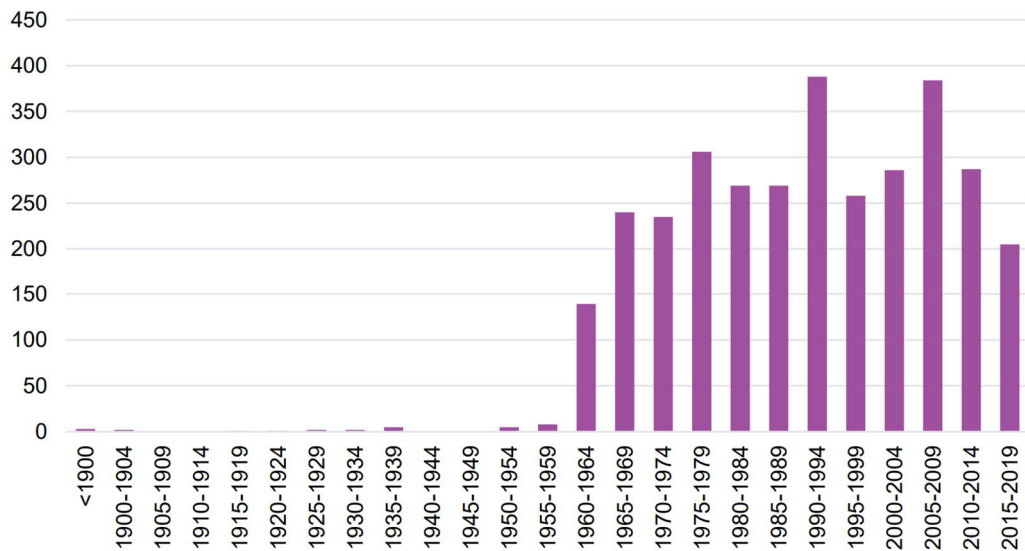
Kuvissa 1, 2 ja 3 on esitettyä tieliikenteen siltojen (varsinaiset sillat ja putkisillat) lukumäärien jakauma siltatyypeittäin, tieliikenteen putkisiltojen lukumäärien jakauma käyttötarkoituksittain ja tieliikenteen putkisiltojen ikäjakauma.



**Kuva 1.** Tieliikenteen siltojen lukumäärien jakauma siltatyypeittäin [24].



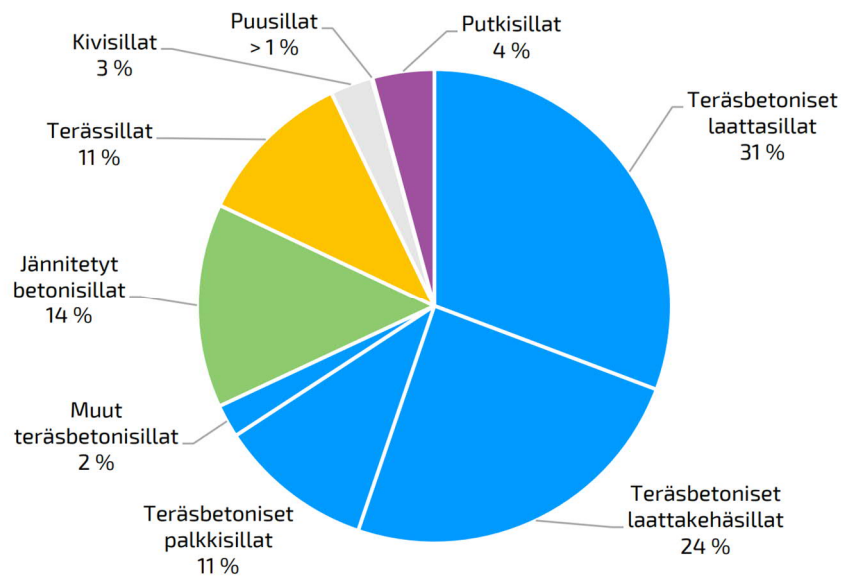
**Kuva 2.** Tieliikenteen putkisiltojen lukumäärien jakauma käyttötarkoituksittain [24].



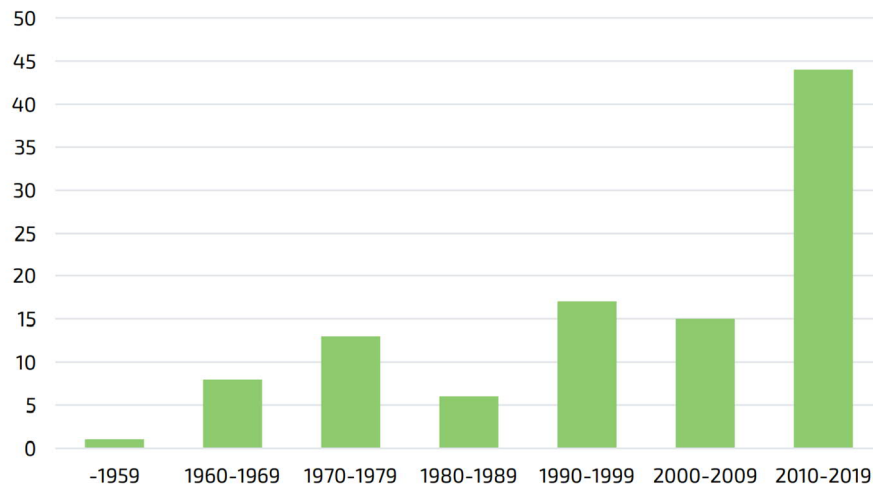
**Kuva 3.** Tieliikenteen putkisiltojen ikäjakauma Suomessa (kpl) [24].

Rekisteröityjä rataliikenteen putkisiltoja on Suomessa 104 kappaletta, joista 49 kappaletta on vesistösiltoja. Väyläviraston kuntoluokitusten perustella huonokuntoisiksi luokiteltavia rataliikenteen putkisiltoja on 0 kappaletta. [24]

Kuvissa 4 ja 5 on esitettyä rataliikenteen siltojen (varsinaiset sillat ja putkisillat) lukumäärien jakauma siltatyypeittäin ja rataliikenteen putkisiltojen ikäjakauma.



**Kuva 4.** Rataliikenteen siltojen lukumäärien jakauma siltatyypeittäin [24].



**Kuva 5.** Rataliikenteen putkisiltojen ikäjakauma Suomessa (kpl) [24].

## 2.2 Putkisiltojen mitoitus

Putket, joiden jännemitta on vähintään 2 metriä, luokitellaan siltarakenteiksi (putkisillat) ja alle 2 metrin jännemittaan omaavat putket luokitellaan rummuiksi (rumpuputket) [16]. Rumpuputket suunnitellaan Suomessa Väyläviraston ohjeen ”Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu (LO 5/2013)” [16] ja InfraRYL osan 1 [12] mukaisesti. Putkisillat suunnitellaan Väyläviraston ohjeiden ”Teräsputkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” [18] ja ”Teräsputkisiltojen toteutusohje (LO 5/2016)” [19] mukaisesti. Putkisiltojen suunnitteluohjeet mahdollistavat vain teräsputkisiltojen suunnittelun [18].

Siltakokoluokassa (jännemitta vähintään 2 metriä) käytettäville muovi- ja komposiittiputkille ei ole aikaisemmin laadittu Väyläviraston suunnitteluohjeita.

Maailmalla muovi- ja komposiittiputkisiltoja suunnitellaan muun muassa alla listattujen ohjeiden mukaisesti:

- Saksa: ATV-DVWK-A 127E Static Calculation of Drains and Sewers 3th edition [4]
- Itävalta: ÖNORM B 5012, Structural design of buried water and sewerage pipelines [25]
- Iso-Britannia: BS 9295, Guide to the structural design of buried pipes [6]
- Ranska: Fascicule 70-1, Fourniture, pose et réhabilitation de canalisations d’eaux àécoulement à surface libre [10]



- Ruotsi ja Norja: VAV P92, Anvisningar för projektering och utförande av markförlagda självfallsledningar av plast [23]
- Espanja: UNE 53331, Plásticos. Tuberías de Poli(cloruro de vinilo) no plastificado (PVC-U), Poli(cloruro de vinilo) orientado (PVC-O), Polietileno (PE) y Polipropileno (PP). Criterio para la comprobación de los tubos a utilizar en conducciones con y sin presión sometidos a cargas externas. [22]
- Yhdysvallat: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [1] ja AWWA M55, PE Pipe - Design and Installation [5]
- Australia ja Uusi-Seelanti: AS/NZS 2566.1, Buried Flexible pipelines – Part 1: Structural Design [2] ja AS/NZS 2566.2, Buried Flexible pipelines – Part 2: Installation [3]

CEN/TR 1295-3 mukainen mitoitusmenetelmä perustuu saksalaiseen ATV-127 ja itävaltalaiseen ÖNORM B 5012 menetelmään [15].

## 3. TARKASTELTAVAT MITOITUSMENETELMÄT

### 3.1 Yleistä

Tässä kappaleessa kuvataan CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmien mukaiset mitoituksen periaatteet. Menetelmien kuvauksissa pyritään luomaan lukijalle kokonaiskuva mitoituksen kulusta ja menetelmien välisistä eroista. Tämän kappaleen lisäksi mitoituksen kokonaiskuva on pyritty esittelemään myös tämän tutkimuksen liitteen A esimerkilaskelmien avulla. Tarkemmin (esimerkiksi yksittäisten laskentakaavojen osalta) menetelmiin voi tutustua alla listattujen menetelmien alkuperäisdokumenttien avulla.

- CEN/TR 1295-3. Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 3: Common method [15]
- ATV-DVWK-A 127E Static Calculation of Drains and Sewers 3rd Edition [4]

Saksalainen ATV mitoitusmenetelmä on julkaistu ensimmäisen kerran vuonna 1984 (1st edition). Uusin ATV versio (3rd edition) julkaistiin elokuussa 2000. [4]

CEN/TR 1295-3 mukainen mitoitusmenetelmä perustuu saksalaiseen ATV-127 ja itävaltalaiseen ÖNORM B 5012 menetelmiin. CEN/TR 1295-3 tarkoituksena oli yhdenmukaistaa Euroopassa käytettäviä muovi- ja komposiittiputkien mitoitusmenetelmiä. CEN/TR 1295-3 julkaistiin elokuussa 2007. [15]

Molemmat menetelmät perustuvat putken ja ympäristäytön muodostaman liittorakenteen toimintaan. Kuormat jakautuvat putken ja ympäristäytön välillä niiden jäykkyyksien suhteessa. Ympäristäytön tiiveys on ratkaisevassa roolissa putkisillan rakenteellisen toimivuuden kannalta. Epäonnistunut tiivistystyö saattaa aiheuttaa putkisillan kantokyvyn pettämisen. Ympäristäytön tiiveyden tärkeyttä tulee korostaa suunnitelma-asiakirjoissa ja hankkeen urakoitsijaosapuolen tulee olla tietoisia sen merkittävydestä. [15, kappale A.5.4.2]

### 3.2 Putken tiedot

CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mukaisissa mitoitusmenetelmissä vaaditaan putken tietojen osalta samat lähtötiedot laskennan suorittamiseksi. Putkilta vaadittavat tiedot ovat listattuna alla: [15] [4]

- Putken mittatiedot sisältäen halkaisijan, seinämävahvuuden ja putkien profiilin poikkileikkauksen mittatiedot ja poikkileikkaussuureet.

- Putkimateriaalin tilavuuspaino.
- Putken rengasjäykkyyydet lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitustilanteissa.
- Putken seinämän kestävyysarvot (muoviputkilla suurimmat sallitut jännitykset ja komposiittiputkilla suurimmat sallitut venymät) lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitustilanteissa. Tarvittaessa kestävyysarvot erikseen vedon ja puristuksen suhteen.
- Putkimateriaalin kestävyysarvot väsymiskuormitusta vastaan kappaleen 5.4 mukaisesti mitoitettavan kuormitusyhteisyyden suhteen.

Muovi- ja komposiittiputkien lyhytaikainen rengasjäykkyys määritellään standardissa SFS-EN ISO 9969 [20] esitetyn menetelmän mukaan. Menetelmä perustuu putken halkaisijaan aiheutettavaan 3 % suuruisen muutokseen ja sitä vastaavaan voimaan. Rengasjäykkyydelle käytetään kaavan 1 mukaista yhteyttä putken parametreihin.

$$S_P = \frac{E_P * I}{D^3} \quad (1)$$

Kaavassa  $S_P$  tarkoittaa putken rengasjäykkyyttä ( $N/mm^2$ ),  $E_P$  putken laskennallista kimmoerotusta ( $N/mm^2$ ),  $I$  putkiprofiilin poikkileikkauksen nelimomenttia ( $mm^4/mm$ ) ja  $D$  putken keskimääräistä halkaisijaa (mm).

Muovi- ja komposiittiputkien pitkäaikainen rengasjäykkyys saadaan selville lyhytaikaisen rengasjäykkyiden ja putken virumaominaisuuksien avulla. Muoviputkien virumaominaisuudet määritellään standardin SFS-EN ISO 9967 [21] esitetyn menetelmän mukaan. Komposiittiputkien virumaominaisuudet määritellään standardin ISO 10468 [11] esitetyn menetelmän mukaan.

### 3.3 Liikenteen aiheuttamat kuormitukset

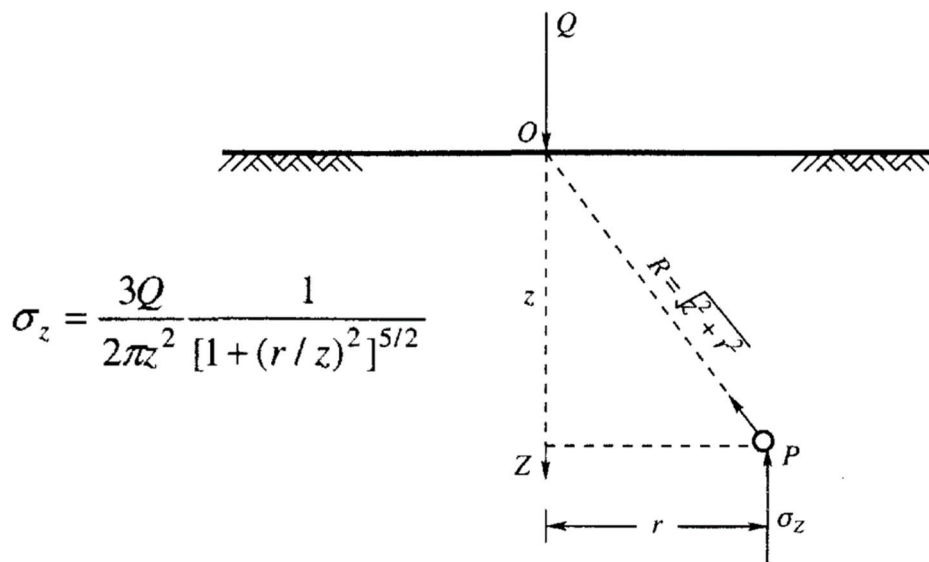
Liikennekuormat ja muut vastaavat maanpinnalla vaikuttavat rajallista pintaa kuormittavat kuormitukset muunnetaan CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmissä putken laen tasolla vaikuttaviksi pystysuuntaisiksi kuormien perusarvoiksi. Maanpinnalla vaikuttavien kuormien oletetaan jakautuvan putken päällä olevan ympärystäytön (peittosyvyyden) matkalla Boussinesqin teorian mukaisesti. Boussinesqin teoriolla laskettuja putken laen syvyydessä vaikuttavia jännityksiä käytetään kuormien perusarvoina, jotka muunnetaan putkeen vaikuttaviksi mitoituskormiksi kappaleissa 3.9 ja 3.10 esitetyillä laskentamekanismeilla. [15, kappale A.6.3] [4, kappale 5.2.2]

CEN/TR 1295-3 sisältää peittosyvyyden mukaan valmiiksi laskettuja Boussinesqin teorian mukaisia kuormituskuvaajia muun muassa standardin EN 1991-2 [7] mukaisille ajoneuvoliikenteen ja rataliikenteen kuormakaavioille. ATV-127 sisältää vastaavia kuvaajia

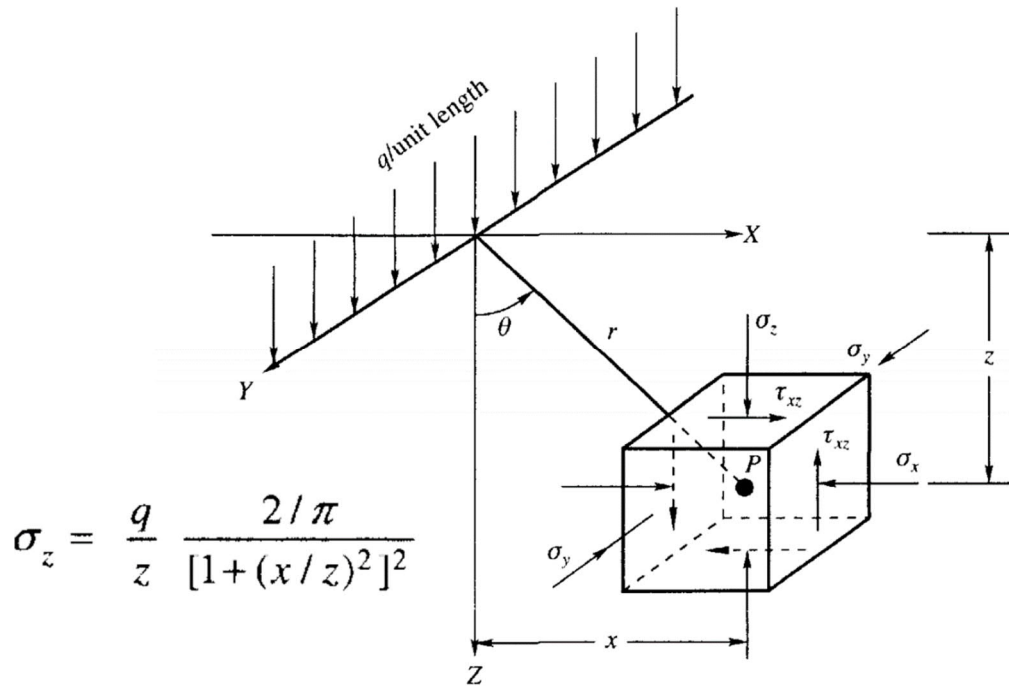
eurokoodeja edeltäneille saksalaisille ajoneuvoliikenteen ja rataliikenteen kuormakaavioille. [15, kappale A.6.3] [4, kappale 5.2.2]

Suomessa siltojen kuormitukset tulee tarkastella EN 1991-2 [7] ja sen kansallisten liitteiden ja Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnittelupeusteet – NCC11 (LO 24/2017)” [9] mukaisesti. Nämä kuormakaaviot poikkeavat CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 esitetystä kuormakaavioista ja näin ollen niille valmiiksi lasketut kuormituskuvaajat eivät myöskään ole tältä osin käyttökelpoisia. Suomessa toteutettavia putkisiltoja varten tulee liikennekuormien aiheuttamat kuormitukset putken laen tasolla laskea erikseen Boussinesqin teorian avulla.

Boussinesqin teorian mukaiset jännitykset mielivaltaisissa tarkastelupisteissä (X,Y,Z) voidaan laskea maanpinnalla vaikuttaville pistekuormille, viivakuormille, nauhakuormille ja kuormituspinta-aloille. Kuvissa 6, 7, 8 ja 9 on esitettyä Boussinesqin teorian mukaisen jännitysten  $\sigma_z$  laskentaa edellä mainituille kuormatyypeille. [13, kappale 6]

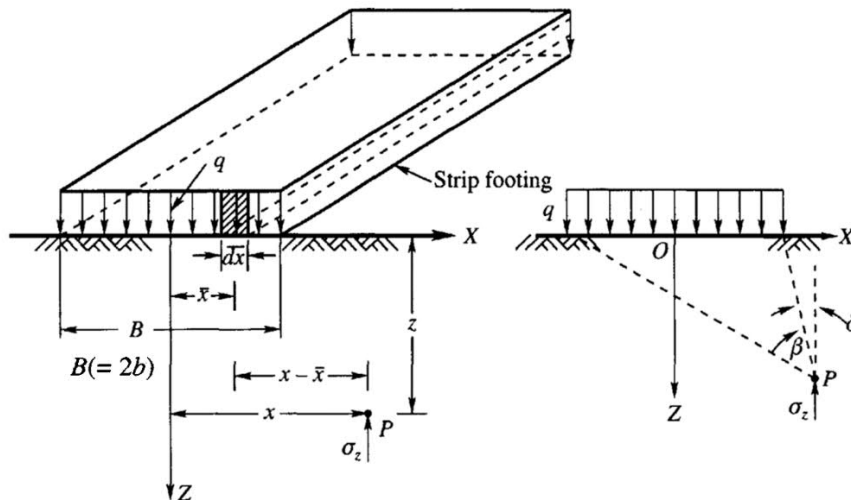


**Kuva 6.** Boussinesqin teorian mukainen jännitysten laskenta maan pinnalla vaikuttavalle pistekuormalle mielivaltaisessa pisteessä. [13, kappale 6.2]

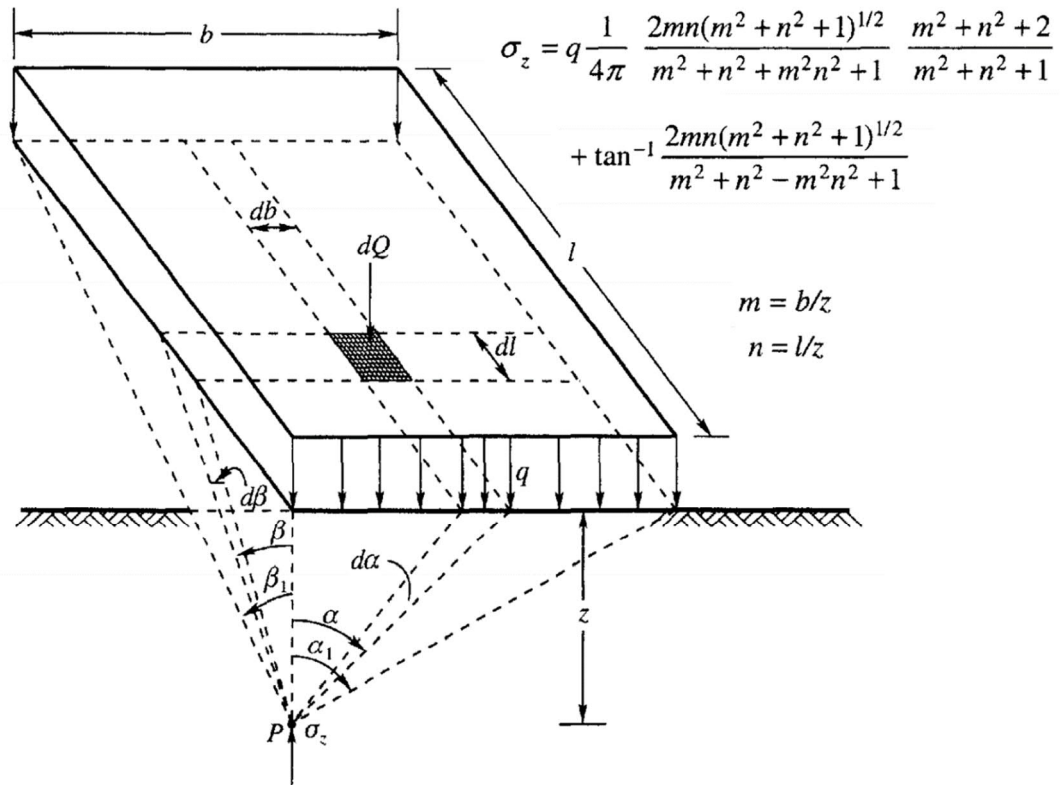


**Kuva 7.** Boussinesqin teorian mukainen jännitysten laskenta maan pinnalla vaikuttavalle viivakuormalle mielivaltaisessa pisteessä. [13, kappale 6.4]

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \tan^{-1} \frac{z}{x-b} - \tan^{-1} \frac{z}{x+b} - \frac{2bz(x^2 - b^2 - z^2)}{(x^2 - b^2 + z^2)^2 + 4b^2z^2}$$

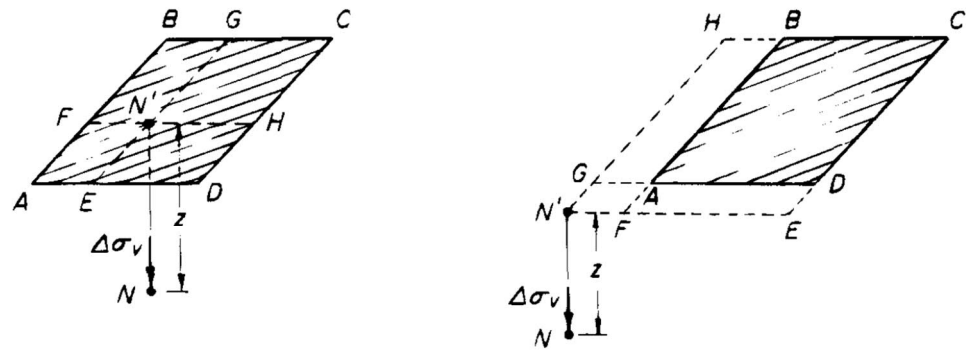


**Kuva 8.** Boussinesqin teorian mukainen jännitysten laskenta maan pinnalla vaikuttavalle nauhakuormalle mielivaltaisessa pisteessä. [13, kappale 6.5]



**Kuva 9.** Boussinesqin teorian mukainen jännitysten laskenta maan pinnalla vaikuttavalle kuormituspinta-alalle kuormituspinnan nurkan alapuolelle laskettuna. [13, kappale 6.6]

Reunamitoiltaan rajallisen kuormituspinta-alan osalta Boussinesqin teoriolla voidaan määrittellä jännitys vain kuormituspinta-alan nurkan kohdalla mielivaltaisessa syvyydessä kuvan 9 mukaisesti. Jännitysten tarkastelupisteen sijaitessa muualla kuin pinta-alan nurkan kohdalla, voidaan jännitykset laskea nurkkajännitysten laskentaa soveltamalla. Mikäli tarkastelupiste sijaitsee kuormituspinnan sisällä, voidaan kuormituspinta-ala jakaa neljään osaan, joiden nurkat sijaitsevat tarkastelupisteessä. Näiden neljän osan nurkkajännitykset voidaan ratkaista ja tarkastelupisteen kokonaisjännitys on niiden summa kuvan 10 vasemman puolen mukaisesti. Mikäli tarkastelupiste sijaitsee kuormituspinta-alan ulkopuolella, voidaan jännitys laskea kuvan 10 oikean puolen mukaisesti katkoviivoilla merkittyjen apupinta-alojen avulla. Lopullinen tarkastelupisteen jännitys saadaan summaamalla ja vähentämällä superpositioperiaatteella pinta-alojen mukaisia nurkkajännityksiä toisistaan, kunnes vain halutun pinta-alan vaikutus on jäljellä. [17, kappale 40]



$$\Delta\sigma_v = (I_{N'EAF} + I_{N'FBG} + I_{N'GCH} + I_{N'HDE}) q$$

$$\Delta\sigma_v = (I_{N'HCE} - I_{N'HBF} - I_{N'GDE} + I_{N'GAF}) q$$

**Kuva 10.** Boussinesqin teorian mukainen mielivaltaisen tarkastelupisteen jännitysten laskentaperiaate maan pinnalla vaikuttavalle kuormituspinta-alalle. [17, kappale 40]

### 3.4 Ympäristäytöt

CEN/TR 1295-3 mukaisessa mitoituksessa putkille valitaan ympäristäytön luokitus neljästä ympäristäyttötäyttyypistä ja tarvittaessa niiden alaluokista. Ympäristäyttöluokat ovat ET1a...c, ET2, ET3a...b, ja ET4a...c (Embedment types). Ympäristäyttöluokituksilla kuvataan erilaisia asennustilanteita, joissa putki asennetaan suoraan kaivannon pohjalle ilman pohjamaan tiivistämistä tai niin että pohjamaa on löyhennetty enne putken asentamista, putki asennetaan tiivistetyn alustäytön päälle, putken ympäristäytöt tehdään kokonaisuudessaan samasta täyttömateriaalista, putken ympäristäytöt tehdään eri täyttömateriaalista putken alle, sivuille ja päälle, putki asennetaan kaivannon pohjalle tehtävä muotoillun betonivalun päälle. [15, kappale A.5.4]

Ympäristäyttöluokituksen lisäksi CEN/TR 1295-3 mukaisessa mitoituksessa valitaan asennusluokka (Installation condition) kolmesta vaihtoehdosta. Luokassa I1 ympäristäyttö tehdään suoraan kaivannon reunoja vasten. Luokassa I2 kaivannossa käytetään väliaikaisia pontteja, jotka vedetään ylös samaan aikaan ympäristäyttöjä tehtäessä. Luokassa I3 kaivannossa käytetään väliaikaisia pontteja, jotka vedetään ylös vasta ympäristäyttöjen valmistuttua. Asennusluokan ja maalajien sisäisten kitkakulmien avulla määritellään mitoituksessa käytettävä kaivannon ja täytön välinen kitkakulma taulukon 1 mukaisesti. [15, kappale A.6.1]

Taulukko 1. *Kaivannon ja ympärystäytön välinen kitkakulma asennusluokan ja maalajien sisäisten kitkakulmien mukaisesti (CEN/TR 1295-3). [15]*

Installation condition	Trench friction angle $\phi_1$
I1	$2 \cdot \phi_1 / 3$
I2	$1 \cdot \phi_1 / 3$
I3	0
NOTE The lower one of the two $\phi_1$ values, i.e. for the soil in the backfill zone and the native soil to the side of the trench, is used for design purposes.	

ATV-127 mukaisessa menetelmässä määritellään CEN/TR 1295-3 menetelmää vastaavat ympärystäytön luokitukset kolmen luokitusvalinnan avulla. ATV-127 menetelmässä määritellään luokat A1-4 (Covering conditions) ja B1-4 (Embedding conditions), jotka kuvaavat ympärystäytöjen tekemistä kaivannon luonnonmaita vasten tiivistämällä tai ilman erillistä tiivistämistä, tai ympärystäytöjen tekemistä väliaikaisten ponttiseinien avulla poistamalla ponttiseinät tiivistyksen aikana tai sen jälkeen. Lisäksi valitaan putken perustamislukitus I-III (Bedding case), joka määrittelee putken tukeutuvan alustäyttöön, luonnonmaahan tai betoniseen alustavaluun. [4, kappaleet 5.2.1.2, 6.2.1 ja 7.2.1]

Edellä esitettyjen lisäksi tulee putken mitoitusta varten määritellä kaivannosta molemmilla menetelmillä laskettaessa alla listatut tiedot. [15, kappale A.2]

- peitesyvyys (pystysuuntainen mitta putken laelta ylittävän tien pintaan)
- kaivannon syvyys (pystysuuntainen mitta kaivannon pohjalta ylittävän tien pintaan)
- kaivannon leveys (erikseen putken laen tasolla ja kaivannon pohjalla)
- kaivannon reunojen kaltevuuskulma
- pohjaveden pinnan korkeus

### 3.5 Ympärystäytöjen tiivistysluokat

CEN/TR 1295-3 mukaisessa mitoituksessa ympärystäytöille valitaan tiivistysluokka kolmesta luokituksesta. Tiivistysluokat ovat "well compacted material", "moderately compacted material" ja "non-compacted". Taulukossa 2 on esitettyjä ohjeistavia arvoja tiivistysluokan valinnalle. Käytettäessä ylös vedettäviä ponttiseiniä kaivannon reunoilla, tulee tiivistysluokituksessa huomioida ponttien ylös vedosta aiheutuvat tiivistyksen heikentymiset erikseen. [15, kappale A.5.4.2]



Taulukko 2. Tiivistysluokan valintaa ohjeistavia ympäristäytön tiivistystapoja (CEN/TR 1295-3). [15]

Piece of compaction equipment	Number of passes for compaction class		Maximum layer thickness, in metres, after compaction for soil group (see Annex A)				Minimum thickness over pipe crown before compaction m
	Well	Moderate	1	2	3 + 4	5	
Foot or hand tamper min. 15 kg	3	1	0,15	0,10	0,10	0,10	0,20
Vibrating tamper min. 70 kg	3	1	0,30	0,25	0,20	0,15	0,30
Plate vibrator min. 50 kg	4	1	0,10	--	--	--	0,15
min. 100 kg	4	1	0,15	0,10	--	--	0,15
min. 200 kg	4	1	0,20	0,15	0,10	--	0,20
min. 400 kg	4	1	0,30	0,25	0,15	0,10	0,30
min. 600 kg	4	1	0,40	0,30	0,20	0,15	0,50
Vibrating roller min. 15 kN/m	6	2	0,35	0,25	0,20	--	0,60
min. 30 kN/m	6	2	0,60	0,50	0,30	--	1,20
min. 45 kN/m	6	2	1,00	0,75	0,40	--	1,80
min. 65 kN/m	6	2	1,50	1,10	0,60	--	2,40
Twin vibrating roller min. 5 kN/m	6	2	0,15	0,10	--	--	0,20
min. 10 kN/m	6	2	0,25	0,20	0,15	--	0,45
min. 20 kN/m	6	2	0,35	0,30	0,20	--	0,60
min. 30 kN/m	6	2	0,50	0,40	0,30	--	0,85
Triple heavy roller (no vibration) min. 50 kN/m	6	2	0,25	0,20	0,20	--	1,00

Tiivistysluokan valinta vaikuttaa putkeen muodostuvien taivutusmomenttien ja normaali-voimien kannalta pääasiassa kolmeen laskentaparametriin, joita ovat:

- $f_c$  = korjauskerroin, joka kohdistetaan täyttömateriaalin kimmomoduulin redusointikertoimeen  $f_{R,TW}$ , jolla huomioidaan kaivannon leveyden vaikutuksia
- $K_1$  ja  $K_2$  = putken sivuilla ja päällä oleviin täyttöihin kohdistettavia kertoimia, joilla kuvataan maassa vaikuttavan sivusuuntaisen ja pystysuuntaisen kuormituksen suhdetta (soil pressure ratio)
- $\alpha_v$  = putken alle maasta muodostuva tuentakulma (määräytyy yhdessä ympäristäytön luokituksen "Embedment type" avulla)

Lisäksi tiivistysluokalla on vaikutus putkeen muodostuvien taipumien laskennassa käytettävään ympäristäytön parametriin  $K_{i0}$ .

ATV-127 mukaisessa mitoitusmenetelmässä ei ole mahdollista vaikuttaa ympäristäytön tiivistyksen tasoon.

### 3.6 Ympäristäytön tiedot

CEN/TR 1295-3 menetelmässä ympäristäyttö voidaan jakaa kolmeen osaan. Putken päälle tehtävään täyttöön, putken sivuille tehtävään täyttöön ja putken alle tehtävään täyttöön. Lisäksi kaivannon luonnonmaat voidaan eritellä kaivannon sivuilla oleviin maihin ja kaivannon pohjalla/alla oleviin maihin. Kaikille edellä mainituille osille voidaan määritellä mitoituksessa käytettävät ominaisuudet erikseen. Maalajeille määriteltävät ominaisuudet ovat listattuna alla: [15, kappale A.7]

- $\gamma_s$  ja  $\gamma_{s,w}$  = maan tilavuuspaino (kuiva- ja märkätilavuus)
- $\Phi_i$  = maan sisäinen kitkakulma
- $D_{Pr}$  = maan tiiveysaste parannetulla Proctor-kokeella (%)
- $E_{sd}$  = maan laskennallinen kimmomoduuli (tangenttimoduuli), riippuvainen maalajin perusominaisuuksien lisäksi myös muun muassa peitesyvyydestä, tiiveysasteesta ja muista kaivannon ominaisuuksista
- $f_{R,T}$  = maan kimmomoduuliin kohdistettava redusointikerroin, jolla huomioidaan maalajin pitkäaikaisia ominaisuuksien muutoksia (koskee lähinnä koheesiomaita, kitkamaille kertoimen arvo on 1,0)
- $K_1$  ja  $K_2$  = putken sivuilla ja päällä oleviin täyttöihin kohdistettavia kertoimia, joilla kuvataan maassa vaikuttavan sivusuuntaisen ja pystysuuntaisen kuormituksen suhdetta (soil pressure ratio)
- $K_{io}$  = maalajista ja maan tiivistysluokasta riippuva apukerroin putkeen muodostuvia alkumuodonmuutoksia laskettaessa

CEN/TR 1295-3 on esitetty 7 erilaista maalajiryhmää (soil groups), joilla edellä mainitut ominaisuudet ovat valmiiksi listattuina tai kaavojen avulla ratkaistavissa. Ryhmät 1-3 kuvaavat kitkamaita ja ryhmät 4-7 koheesiomaita. Näiden lisäksi voidaan käyttää myös itse määriteltäviä maalajeja. [15, kappale A.7]

Taulukoissa 3 ja 4 on kuvattuna CEN/TR 1295-3 mukaisten maalajiryhmien ja tiivistysluokan vaikutusta maalajille valittaviin edellä mainittuihin kertoimiin  $K_1$ ,  $K_2$  ja  $K_{io}$ .

Taulukko 3. Tiivistysluokan ja maalajiryhmän vaikutus kertoimiin  $K_1$  ja  $K_2$  (CEN/TR 1295-3). [15]

Description of soil	Soil pressure ratio $K_1, K_2$ for compaction class		
	Well	Moderate	Non
Group 1	0,4	0,4	0,4
Granular (Groups 2 to 3)	0,4	0,3	0,2
Cohesive (Groups 4 to 7)	0,6	0,5	0,4

Taulukko 4. Tiivistysluokan ja maalajiryhmän vaikutus kertoimen  $K_{i0}$  valintaan (CEN/TR 1295-3). [15]

Backfill material Soil group $G_s$	$K_{i0}$ for compaction class		
	Well	Moderate	Non
1	0,15	0,08	0
2	0,7	0,3	0
3 + 4	1,0	0,5	0
5	1,5	0,6	0

ATV-127 menetelmässä ympärystäytöt määritellään CEN/TR 1295-3 vastaavalla tavalla osissa putken ja kaivannon ympärille. Maalajeilta vaaditaan vastaavat ominaisuustiedot kuin CEN/TR 1295-3 menetelmässäkin. Lukuun ottamatta alkumuodonmuutosten laskentaan liittyvän kertoimen  $K_{i0}$  puuttumista ja termejä kuvaavien symbolien merkintäeroja. ATV-127 ei huomioi putkeen muodostuvia alkumuodonmuutoksia. ATV-127 mukaisessa menetelmässä maalajit on jaettu 4 maalajiryhmään (soil groups). Ryhmä 1 sisältää kitkamaat ja ryhmät 2-4 koostuvat koheesiomaista. Näiden lisäksi voidaan käyttää myös itse määriteltäviä maalajeja. [4, kappaleet 3.1, 5.2 ja 6.2]

Taulukoissa 5 ja 6 on esitettyä ATV-127 menetelmässä käytettävät arvot kertoimille  $K_1$  ja  $K_2$  ja kaivannon ja ympärystäytön väliselle kitkakulmalle  $\delta$ .  $K_2$  kertoimen taulukossa esiintyvä putken ja maan välinen jäykkyysuhde  $V_{PS}$  esitetään tarkemmin kappaleessa 3.9. [4, kappaleet 5.2 ja 6.2]

Taulukko 5. *Kaivannon ja ympärystätön välinen kitkakulma ja maanpainekerroin  $K_1$  (ATV-127). [4]*

Covering conditions	$K_1$	$\delta$
A1	0.5	$\frac{2}{3}\varphi'$
A2	0.5	$\frac{1}{3}\varphi'$
A3	0.5	0
A4	0.5	$\varphi'$

Taulukko 6. *Maanpainekertoimen  $K_2$  määrittäminen maalajiryhmän ja putken ja maan välisen jäykkyyssuhteen avulla (ATV-127). [4]*

Soil Group	$K_2$	
	$V_{PS} > 1$	$V_{PS} \leq 1$
G1	0.5	0.4
G2	0.5	0.3
G3	0.5	
G4	0.5	
Bedding reaction pressure	$q_h^* = 0$	$q_h^* > 0$

### 3.7 Siiloteoria

CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mahdollistavat niin sanotun siiloteorian mukaisten redusointikertoimien käytön putkea kuormittavien pystysuuntaisten kuomien määrittämisessä (ympärystätön kuorma ja liikennekuormat). Siiloteoriassa maatätön ja kaivannon luonnonmaan rajapintaan muodostuva kitka vähentää pystysuuntaista kuormitusta putkelta holvaamalla siitä osuuden suoraan penkereille. [15, kappale A.6.1] [4, kappale 5.2.1.1]

Siiloteorian mukaiset redusointikertoimet voidaan hyödyntää, mikäli voidaan todeta, että maamassojen välinen kitka tulee säilymään koko putkisillan käyttöajan ajan. Kitkan kuormia vähentävä vaikutus voidaan menettää esimerkiksi putken viereen myöhemmin tehtävien kaivujen takia tai kelvottoman ympärystätön tiivistystyön ansiosta. Lisäksi kaivannon ja pengertätön mittojen tulee pysyä mitoitusmenetelmissä esitettyjen raja-arvojen sisällä. [15, kappale A.6.1]

Siiloteorian mukaiset redusointi kertoimet lähestyvät arvo 1,0 kaivannon leveyden kasvaessa tai kaivannon kaltevuuden loiventuessa. [4, kappale 5.2.1.1]

CEN/TR 1295-3 mukaan siiloteorian mukaiset redusointikertoimet määritetään putken päällä olevan maataytön osalta laskemalla ensin apusuure  $\kappa_{90}$ , joka kuvaa pystysuuntaisilla kaivannon reunoilla olevaa tilannetta. Lopullinen redusointikerroin  $\kappa_{\beta}$  lasketaan apusuureen  $\kappa_{90}$  avulla huomioimalla kaivannon leveys ja kaivannon reunojen kaltevuus. Redusointikertoimet  $\kappa_{a\beta}$  sivusuunnissa rajattomalle pintakuormalle määritellään vastaavasti apusuureen  $\kappa_{a,90}$  avulla. [15, kappale A.6.1 ja A.6.2.2]

ATV-127 mukaiset siiloteorian redusointikertoimet määritellään identtisillä kaavoilla CEN/TR 1295-3 mitoitusmenetelmään verrattuna. Vain kertoimien symbolit ovat erilaiset. ATV-127 menetelmässä pengertäytön kertoimia kuvataan symboleilla  $\kappa$  ja  $\kappa_{\beta}$ . Rajattoman pintakuorman symboleina käytetään  $\kappa_o$  ja  $\kappa_{o\beta}$ . [4, kappale 5.2.1.1]

### 3.8 Mitoituksen kulku ja kelpoisuuden toteaminen

Putkien mitoitus voidaan suorittaa edellisissä kappaleissa 3.2-3.7 esitettyjen mitoituksen lähtötietojen perusteella (putken tiedot, liikennekuormien perusarvot putken laella, kaivannon tiedot ja ympäristäytön luokitukset, ympäristäytön tiivistysluokka, ympäristäytön tiedot ja siiloteorian mukaiset vähennykset putken laella vaikuttuviin täytön ja liikennekuormien perusarvoihin). Mitoituksen kulku on pääpiirteissään sama CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 välillä, mutta eroavaisuuksia on löydettävissä mitoitusvaiheiden sisällä. Mitoitus suoritetaan alla listatuissa vaiheissa: [15] [4]

- Putken ja maan välisten jäykkyysarvojen ja jäykkyysuhteiden määrittäminen. Jäykkyysuhteella kuvataan kuormien jakautumista putken ja ympäristäytön välillä.
- Jäykkyysuhteilla putkelle määritettyjen kuormien laskenta ja kuormien putkeen aiheuttavien mitoittavien normaalivoimien ja taivutusmomenttien laskenta.
- Voimasuureiden avulla laskettavat putkeen muodistuvat jännitykset ja venymät. Jännitysten ja venymien kelpoisuuden toteaminen materiaalin kestävyysarvoihin verrattuna.
- Putkeen muodostuvien taipumien laskenta ja niiden kelpoisuuden toteaminen asetettuihin raja-arvoihin nähden.
- Putken seinämän nurjahdustarkastelut ja putken väsymismitoitus.

Kelpoisuus todetaan vertaamalla rasiusten mukaista arvoa vastaavaan kestävyden arvoon. Arvojen suhteen tulee täyttää vaadittu kokonaisvarmuus. Tarkastelut suoritetaan lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitusilanteissa. Lyhytaikaiset tarkastelut noudattavat samaa tapaa mitoitusmenetelmien välillä, jossa edellä mainitut laskentavaiheet tarkastellaan

putken ja maan lyhytaikaisten materiaali- ja jäykkyysominaisuuksien avulla. Pitkäaikaiset mitoitustarkastelut eroavat toisistaan mitoitusmenetelmien välillä. [15] [4]

CEN/TR 1295-3 menetelmän mukaisessa pitkäaikaisessa mitoituslaskennassa suoritetaan rinnakkaiset tarkastelut putken ja maan lyhyt- ja pitkäaikaisilla ominaisuuksilla putkeen vaikuttavien kuormien lyhyt- ja pitkäaikaisuuden mukaisesti. Lyhytaikaisten kuormien tarkastelut suoritetaan lyhytaikaisilla putken ja maan ominaisuuksilla ja jäykkyysuhteilla ja vastaavasti pitkäaikaisten kuormien tarkastelut putken ja maan pitkäaikaisominaisuuksilla ja jäykkyysuhteilla. Lopuksi lyhyt- ja pitkäaikaiset välitulokset yhdistetään toisiinsa, jolloin saadaan pitkäaikaisen tilanteen mitoitustulokset. [15]

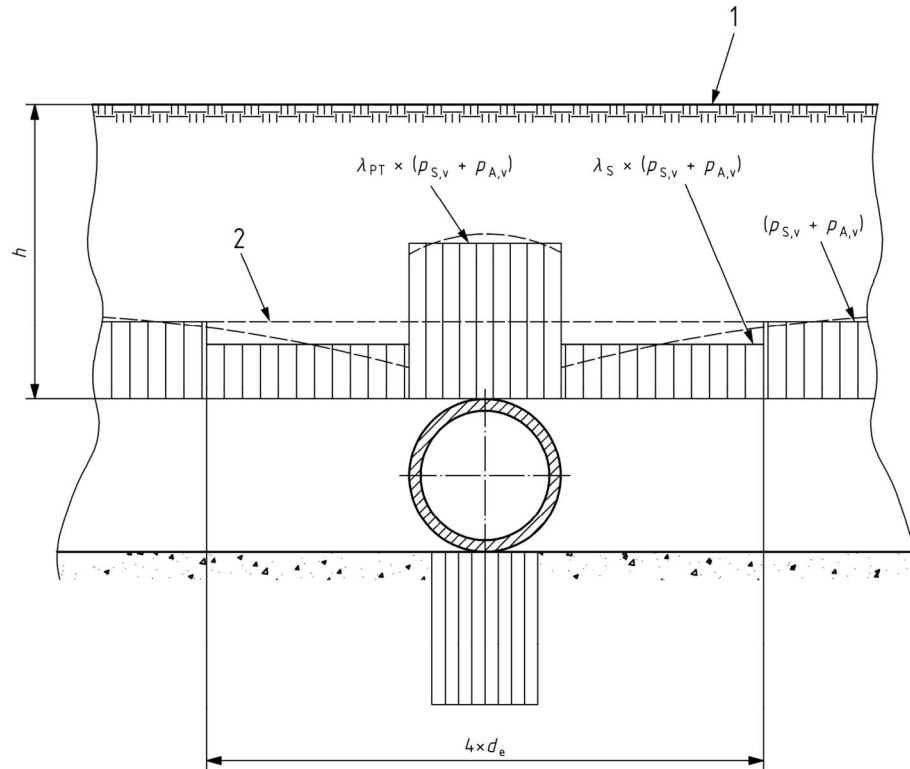
ATV-127 menetelmässä pitkäaikaiset mitoitustulokset lasketaan yksittäisellä laskennalla, jossa putken ja maan ominaisuuksina ja jäykkyysuhteina käytetään lyhyt- ja pitkäaikaisten arvojen painotettuja keskiarvoja putken laella vaikuttavien pystysuuntaisten lyhyt- ja pitkäaikaisten kuormien suuruuksien suhteessa. [4]

Mitoitusmenetelmien väliset pitkäaikaistilanteen laskennat palaavat lopulta samaan vaiheeseen kuin lyhyt aikaisessakin tilanteessa, jossa lopputuloksia verrataan tarvittavaan kokonaisvarmuuslukuun.

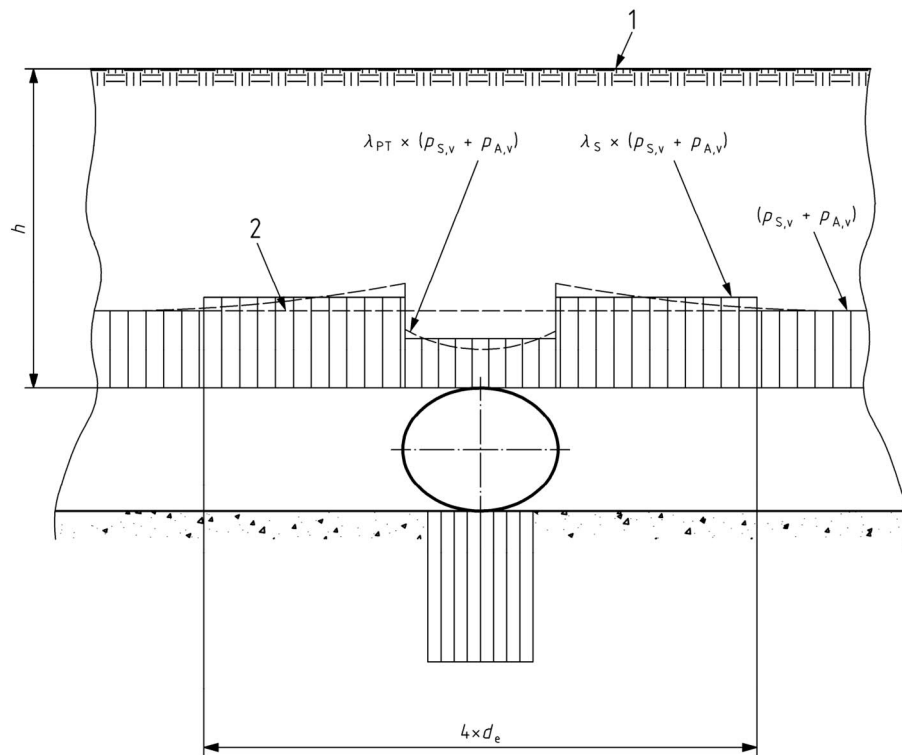
### 3.9 Kuormien jakautuminen

CEN/TR 1295-3 mukaisessa menetelmässä kuormat jakautuvat maan putken välillä niiden jäykkyysuhteiden mukaisesti. Putken laella vaikuttavat kuormitusten perusarvot kerrotaan jakautumiskertoimien  $\lambda_i$  avulla, jolloin saadaan putkeen ja sen viereiseen ympäristytyttöön jakautuvat kuormien arvot. [15, kappale A.8.1]

Kuvissa 11 ja 12 on esitettyä kuormien jakautumista jäykän putken (rigid pipe) ja taipuisan putken (flexible pipe) tilanteissa. Kuvassa on merkitty maanpinnan tasoa tunnuksella 1 ja tunnuksella 2 on merkitty putken laella vaikuttavaa kuormituksen perusarvoa ennen jakautumiskertoimien  $\lambda_i$  käyttöä.



**Kuva 11.** CEN/TR 1295-3 mukainen kuormien jakautuminen maan ja putken välillä jäykällä putkella (rigid pipe). [15]



**Kuva 12.** CEN/TR 1295-3 mukainen kuormien jakautuminen maan ja putken välillä taipuisalla putkella (flexible pipe). [15]

Kuormien jakautumiskertoimien  $\lambda_i$  määrittämiseksi CEN/TR 1295-3 mukaan tulee ratkaista alla listatut laskentaparametrit: [15, kappale A.8]

- putken alapintaan maasta muodostuvan tuentakulman suuruus  $\alpha_v$
- tuentakulmasta ja putken muodosta riippuvat pysty- ja vaakasuuntaiset muodonmuutoskertoimet  $c_{ii}$
- ympärystäytön pystysuuntaiset ja vaakasuuntaiset jäykkyysstermit ( $S_{Bv}$  ja  $S_{Bh}$ )
- putken jäykkyysstermit (lyhyt- ja pitkäaikainen rengasjäykkyys)  $S_P$
- ympärystäytön ja putken muodostavan kokonaisuuden jäykkyysstermit ( $V_S$  ja  $V_{PS}$ )

CEN/TR 1295-3 mukaan putken alapintaan muodostuva maan tuentakulma  $\alpha_v$  määritellään taulukon 7 mukaisesti. Määrittämisessä käytetään aiemmin valittuja ympärystäytön luokituksia, ympärystäytön tiivistysluokkaa ja putken jäykkyysluokitusta (rigid, flexible tai semi-flexible). [15, kappale A.8.2.3.3.3]

Taulukko 7. Putken alle muodostuvan tuentakulman määrittäminen CEN/TR 1295-3 mukaisesti. [15]

Type of embedment		Deformation criterion					
		Flexible			semi-flexible and rigid		
		$\alpha_v$ for compaction class					
		Well	Moderate	Non	Well	Moderate	Non
ET1	a, b <sup>a</sup>	120°	90°	60°	60°	60°	30°
	c	60°	60°	60°	60°	60°	60°
ET2	a	180°	180°	120°	120°	120°	90°
ET3	b	120°	120°	120°	120°	120°	120°
ET4	—	—	—	—	90° to 180°		

<sup>a</sup> the values given are based on the same compaction classes for the haunches and the sidefill.  
<sup>b</sup> where for embedment type ET3b the native soil is significantly stiffer than the haunches following compaction the vertical support angle shall be reduced by 30°

CEN/TR 1295-3 mukaan muodonmuutoskertoimet  $c_{ii}$  määritellään taulukoiden 8 ja 9 mukaisesti erikseen jokaiselle kuormitustyyppille. Määrittämisessä käytetään maan tuentakulmaa, putken muotoa ja tarkasteltavan kuormituksen tyyppiä. [15, kappale A.8.3.4]



Taulukko 8. Pystysuuntaisten muodonmuutoskertoimien määrittäminen CEN/TR 1295-3 mukaisesti. [15]

Pipe shape	Vertical support angle $\alpha_v$	Coefficients for soil support				
		$c_{vv}$	$c_{vh}$	$c_{vd}$	$c_{v,ow}$	$c_{v,w}$
Circular	30°	-0,112 90	0,083 58	0,041 79	-0,218 7	-0,109 10
	60°	-0,105 29	0,083 58	0,041 79	-0,198 3	-0,098 92
	90°	-0,096 58	0,083 58	0,041 79	-0,181 9	-0,090 75
	120°	-0,089 29	0,083 58	0,041 79	-0,168 2	-0,084 63
	180°	-0,083 63	0,083 58	0,041 79	-0,156 9	-0,078 25
Egg	Base width	-0,116 70	—	—	—	—

Taulukko 9. Vaakasuuntaisten muodonmuutoskertoimien määrittäminen CEN/TR 1295-3 mukaisesti. [15]

Pipe shape	Vertical support angle $\alpha_v$	Coefficients for soil support				
		$c_{hv}$	$c_{hh}$	$c_{hd}$	$c_{h,ow}$	$c_{h,w}$
Circular	30°	0,109 80	-0,083 63	-0,041 83	0,207 3	0,101 60
	60°	0,102 58	-0,083 63	-0,041 83	0,190 5	0,094 75
	90°	0,095 58	-0,083 63	-0,041 83	0,177 5	0,088 25
	120°	0,089 08	-0,083 63	-0,041 83	0,165 4	0,082 3
	180°	0,083 58	-0,083 63	-0,041 83	0,154 8	0,077 00
Egg	Base width	0,165 80	-0,289 20	—	0,330 0	0,095 00

Ympäristäytön ominaisuuksien ja edellä esitettyjen muodonmuutoskertoimien avulla lasketaan ympäristäytön jäykkyystermit  $S_{Bv}$  ja  $S_{Bh}$ . Putken jäykkyystermeinä käytetään kappaleessa 3.2 määriteltyjä rengasjäykkyyksiä. Ympäristäytön ja putken jäykkyystermien ja muodonmuutoskertoimien avulla ratkaistaan kokonaisuuden jäykkyystermit  $V_s$  ja  $V_{ps}$ . Lopulta kaikkia edellä mainittuja yhdessä käyttäen lasketaan CEN/TR 1295-3 mukaiset jakautumiskertoimet  $\lambda_i$ . Jakautumiskertoimissa huomioidaan niille asetetut ylä- ja alarajat. [15, kappale A.8]

ATV-127 mukaisessa menetelmässä määritellään vastaavat kuormien jakautumiskertoimet  $\lambda_i$ . Jakautumiskertoimien määrittely noudattaa periaatteiltaan CEN/TR 1295-3 mukaista menetelmää, mutta laskentakaavoissa ja valittavissa muodonmuutoskertoimissa on paikallisia eroja. ATV-127 menetelmässä määritellään putken alapinnan tuentakulma kaivannon perustamislukituksen (Bedding case) mukaan annettujen suositusarvojen perusteella. Muodonmuutoskertoimet  $c_{ij}$  valitaan taulukoista tuentakulman mukaisesti, mutta kertoimien arvoissa on paikallisia eroja CEN/TR 1295-3 kertoimiin nähden. ATV-127 mukaan laskettavat ympäristäytön jäykkyyskertoimet, putken ja ympäristäytön muodostaman kokonaisuuden jäykkyyskertoimet ja lopulta kuormien jakautumiskertoimet lasketaan päällepäin samoilla kaavoilla CEN/TR 1295-3 menetelmään nähden,

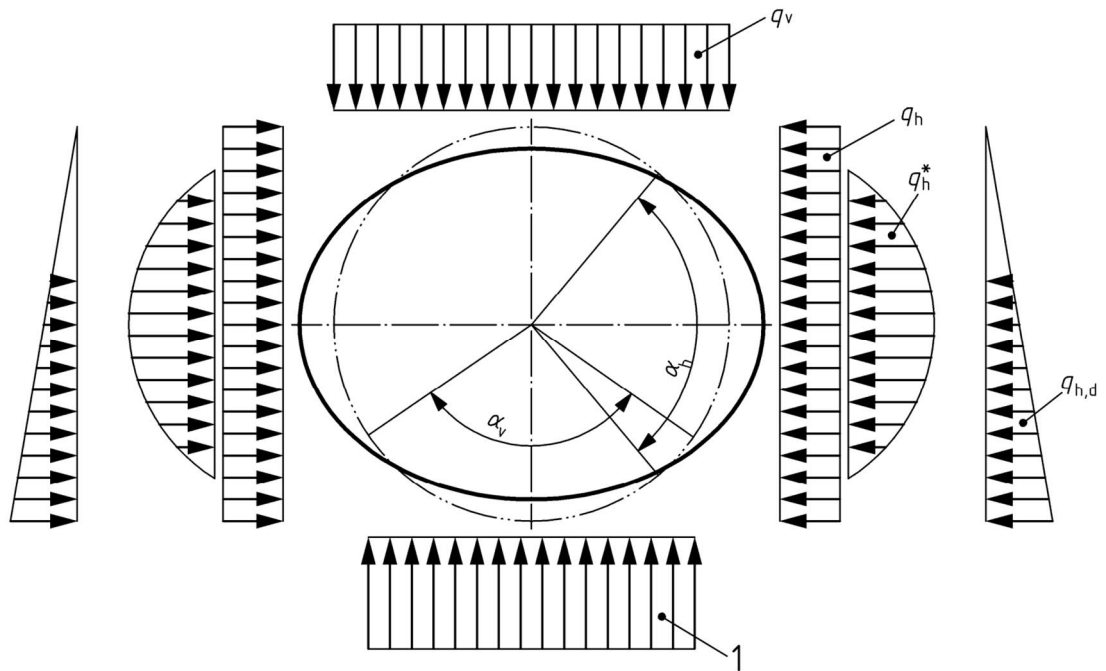
mutta kaavoissa on paikallisia eroja ja kaavojen tuloksille määrätään poikkeavia ylä- ja alarajojen arvoja ja niiden laskentakaavoja. [4, kappaleet 6 ja 7.2]

ATV-127 ja CEN/TR 1295-3 menetelmillä kuormien jakautumiseen liittyville kertoimille saadaan toisistaan poikkeavat arvot, vaikka laskennassa käytettäisiin kappaleessa 4.8 määritettyjä laskentaa yhtenäistäviä mitoitusvalintoja. Tässä laskentavaiheessa ja kappaleessa 3.10 esitetyssä laskentavaiheessa menetelmien välille muodostuvilla parametrien suuruuseroilla on merkittävin vaikutus kappaleessa 4.8 esitettyjen mitoitus lopputulosten eroavaisuuksiin.

### 3.10 Putkeen kohdistuvat kuormitukset

CEN/TR 1295-3 mukaisessa menetelmässä putkeen kohdistuvat pysty- ja vaakasuuntaiset mitoittavat kuormitukset lasketaan putken laella vaikuttavasta pystysuuntaisista kuormien perusarvoista jakautumiskertoimien  $\lambda_i$ , muodonmuutuskertoimien  $c_{ii}$  ja putken sivuilla olevan ympäristäytön kuormakertoimien  $K_2$  avulla. Putkeen kohdistuvat kuormitukset voidaan jakaa neljään pääryhmään alla olevan listauksen ja kuvan 13 mukaisesti: [15, kappale A.9]

- $q_v$  = pystysuuntainen kuorma putken laella ja sitä vastaava maan tuentakulman mukainen tukireaktio putken pohjalla
- $q_h$  = putken laella vaikuttavasta pystysuuntaisesta kuormasta aiheutuva vaakasuuntainen maanpaine kuorma (lepopaine)
- $q_{h,d}$  = putken sivuilla vaikuttavasta ympäristäytöstä aiheutuva vaakasuuntainen maanpaine kuorma (lepopaine putken halkaisijan korkeuden matkalla)
- $q_h^*$  = putken muodonmuutoksesta (taipumasta) aiheutuva vaakasuuntainen ympäristäytön tukireaktion maanpaine kuorma (passiivipaine)



**Kuva 13.** Putkeen kohdistuvat kuormitukset. Kuvaan merkittynä myös maan pysty- ja vaakasuuntaiset tuentakulmat ( $\alpha_v$  ja  $\alpha_h$ ) ja pystysuuntaisen tuentakulman mukainen maan pystytukireaktion kuormitus (1). [15]

ATV-127 menetelmässä ratkaistaan putkeen kohdistuvat kuormitukset vastaavasti jakautumiskertoimien  $\lambda_i$ , muodonmuutoskertoimien  $c_{ii}$  ja ympäristäytön kuormakertoimien  $K_2$  avulla. Periaatetasolla menettely vastaa CEN/TR 1295-3 mukaista menetelmää, mutta menetelmien väliset laskentatavat eroavat toisistaan paikallisesti. Merkittävimmät eroavaisuudet ovat listattuna alla:

- CEN/TR 1295-3 menetelmässä putken laella vaikuttavaa pystykuormaa  $q_v$  laskettaessa voidaan jakautumiskertoimet  $\lambda_i$  kohdistaa ympäristäytön ja liikennekuormien arvoihin [15, kappale A.9.2]. ATV-127 menetelmässä jakautumiskertoimet kohdistetaan vain ympäristäytön ja maanpinnalla olevien tasaisesti jakautuneiden pintakuormien kuormituksiin. Liikennekuormien paikalliset vaikutukset (pyöräkuormat) huomioidaan täysmääräisinä [4, kappale 6.6].
- CEN/TR 1295-3 menetelmässä lasketaan erikseen vaakasuuntaiset kuormitukset  $q_h$  ja  $q_{h,d}$  [15, kappale A.9.3]. ATV-127 mukaisessa menetelmässä vastaavien kuormien vaikutukset ovat yhdistettynä kuormitustunnuksen  $q_h$  alle. ATV-127 ei sisällä kolmiomaista  $q_{h,d}$  lepopaineen laskentaa, vaan sen vaikutus huomioidaan käyttämällä lepopaineen  $q_h$  laskennassa tarkastelusyvyytenä putken laen tason sijaista putken korkeuden puolivälin tasoa [4, kappale 7.3].

- Vaakasuuntaisen tukireaktion (passiivipaine) aiheuttama kuormitus tarkastellaan mitoitusmenetelmissä toisistaan merkittävästi poikkeavalla tavalla. CEN/TR 1295-3 mukainen  $q_n^*$  kuorma saadaan laskettua noin kolmelle sivulle kirjatun laskennan tuloksena [15, kappale A.9.3.4]. ATV-127 mukainen vastaava  $q_n^*$  lasketaan yksittäisen laskentakaavan avulla [4, kaava 7.02a].

Tässä kappaleessa esitetyillä putkelle muodostuvilla kuormituksilla ja kappaleessa 3.9 esitettyjen kuormien jakautumisperiaatteiden mukaisilla mitoitusapojen eroavaisuuksilla on merkittävin vaikutus kappaleiden 4.8 ja 4.9 vertailulaskelmien lopputuloksiin. Toinen merkittävä laskentamenetelmien välinen ero on pitkäaikaisen mitoitusilanteen käsitteilyssä kappaleessa 3.8 esitetyllä tavalla.

### 3.11 Putken voimasuureet, jännitykset ja venymät

Putkeen muodostuvat normaalivoimat ja taivutusmomentit lasketaan CEN/TR 1295-3 menetelmän mukaisesti erikseen yksittäisille kuormille käyttäen edellisen kappaleen mukaisia kuorma-arvoja. Yksittäisten kuormien aiheuttamat voimasuureet summataan toisiinsa kappaleessa 3.8 esitetyn lyhyt- ja pitkäaikaistilanteiden mukaisesti. Voimasuureet lasketaan erikseen putken laelle (top/crown), putken sivuille (haunch/springline) ja putken pohjalle (bottom/invert). Laskennassa putkeen kohdistuvat kuormat muunnetaan putken seinämissä vaikuttaviksi voimasuureiksi muuntokertoimien  $m_i$  ja  $n_i$  ja putken keskimääräisen säteen mukaisesti. Alla on esitettyinä esimerkkikaavat 2 ja 3 voimasuureiden laskemiseen liikennekuorman pystysuuntaisesta kuormituksesta: [15, kappale A.12.2]

$$M_{qv2} = m_{qv} \cdot q_{v2} \cdot r_m^2 \quad (2)$$

$$N_{qv2} = n_{qv} \cdot q_{v2} \cdot r_m \quad (3)$$

Kaavoissa  $m_{qv}$  ja  $n_{qv}$  ovat putken päällä vaikuttavan pystysuuntaisen kuorman muuntokertoimia,  $r_m$  on putken keskimääräinen säde ja  $q_{v2}$  on liikennekuorman aiheuttaman pystysuuntaisen kuormituksen mitoitusarvo putken laella.

Taulukoissa 10 ja 11 on esitettyinä muutamia CEN/TR 1295-3 mukaisia muuntokertoimia  $m_i$  ja  $n_i$ . Kertoimet vaihtelevat kuormien tyyppin, rasitusten laskentasisjainnin, putken perustamistapojen, putken muodon ja putken alapinnan tuentakulman mukaisesti. Kokonaisuudessaan muuntokertoimet ovat tarkasteltavissa CEN/TR 1295-3 kappaleessa A.12.2. [15, kappale A.12.2]

Taulukko 10. CEN/TR 1295-3 mukaisia taivutusmomenttien muuntokertoimia  $m_i$ . [15]

$\alpha_v$	Loc. <sup>a</sup>	$m_{qv}$	$m_{qh}$	$m_{ow}$	$m_w$	$m_{qhd}$
		for support on soil				
30°	C	+0,296	-0,250	+0,489	+0,244	-0,104
	S	-0,303	+0,250	-0,560	-0,280	+0,125
	B	+0,468	-0,250	+1,127	+0,563	-0,146
60°	C	+0,286	-0,250	+0,459	+0,229	-0,104
	S	-0,293	+0,250	-0,529	-0,264	+0,125
	B	+0,377	-0,250	+0,840	+0,420	-0,146
90°	C	+0,274	-0,250	+0,419	+0,210	-0,104
	S	-0,279	+0,250	-0,485	-0,243	+0,125
	B	+0,314	-0,250	+0,642	+0,321	-0,146
120°	C	+0,261	-0,250	+0,381	+0,190	-0,104
	S	-0,265	+0,250	-0,440	-0,220	+0,125
	B	+0,275	-0,250	+0,520	+0,260	-0,146
180°	C	+0,250	-0,250	+0,345	+0,172	-0,104
	S	-0,250	+0,250	-0,393	-0,196	+0,125
	B	+0,250	-0,250	+0,441	+0,220	-0,146
<sup>a</sup> Location at the pipe's circumference: C ≡ crown S ≡ springline B ≡ bottom						

Taulukko 11. CEN/TR 1295-3 mukaisia normaalivoimien muuntokertoimia  $n_i$ . [15]

$\alpha_v$	Loc. <sup>a</sup>	$n_{qv}$	$n_{qh}$	$n_{ow}$	$n_w$	$n_{qhd}$
		for support on soil				
30°	C	+0,099	-1,000	+0,478	+0,739	-0,333
	S	-1,000	0	-1,571	+0,215	0
	B	-0,099	-1,000	-0,478	+1,261	-0,667
60°	C	+0,080	-1,000	+0,417	+0,708	-0,333
	S	-1,000	0	-1,571	+0,215	0
	B	-0,080	-1,000	-0,417	+1,292	-0,667
90°	C	+0,053	-1,000	+0,333	+0,667	-0,333
	S	-1,000	0	-1,571	+0,215	0
	B	-0,053	-1,000	-0,333	+1,333	-0,667
120°	C	+0,027	-1,000	+0,250	+0,625	-0,333
	S	-1,000	0	-1,571	+0,215	0
	B	-0,027	-1,000	-0,250	+1,375	-0,667
180°	C	0	-1,000	+0,167	+0,583	-0,333
	S	-1,000	0	-1,571	+0,215	0
	B	0	-1,000	-0,167	+1,417	-0,667
<sup>a</sup> Location at the pipe's circumference: C ≡ crown S ≡ springline B ≡ bottom						

ATV-127 mukaisessa mitoitusmenetelmässä putkeen kohdistuvat kuormien mitoitusarvot muutetaan putkessa vaikuttaviin voimasuureisiin CEN/TR 1295-3 menetelmää vastaavalla kaavoilla muuntokertoimien avulla. ATV-127 mukaiset muuntokertoimet ovat arvoiltaan samat kuin CEN/TR 1295-3 menetelmässä käytetyt. Mitoituskuormien muuntaminen putken voimasureiksi tapahtuu siis mitoitusmenetelmissä identtisellä tavalla. [4, kappale 8.1]

CEN/TR 1295-3 menetelmän mukaan putken seinämään mitoitusvoimasuureista muodostuvat jännitykset lasketaan kaavalla 4. Jännitykset lasketaan erikseen putken seinämän sisä- ja ulkopintojen suhteen. [15, kappale A.12.3]

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A} + c_{ci/co} \cdot \frac{M_i}{W} \quad (4)$$

Kaavassa N ja M ovat tarkasteltavat voimasuureet, A on putken profiilin pinta-ala, W on putken profiilin taiputusvastus tarkasteltavan pinnan suhteen,  $c_{ci}$  on momentin aiheuttaman jännityksen korjauskerroin putken sisäpinna suhteen ja  $c_{co}$  on vastaava korjauskerroin putken ulkopinnan suhteen.

Putken seinämän ulko- ja sisäpintoihin muodostuvat venymät ratkaistaan jännitysten ja putken laskennallisen kimmokerroimen avulla kaavan 5 mukaisesti. [15, kappale A.12.3]

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_p} \quad (5)$$

Kaavassa  $\sigma_i$  on tarkasteltavan pinnan jännitys edellisen kohdan mukaisesti ja  $E_p$  on putken laskennallinen kimmokerroin kappaleen 3.2 mukaisesti.

ATV-127 mukaisessa mitoitusmenetelmässä putkeen muodostuvat jännitykset ja niitä vastaavat venymät lasketaan edellä esitettyyn CEN/TR 1295-3 menetelmään verrattuna identtisillä kaavoilla. [4, kappaleet 8.2 ja 8.3]

### 3.12 Putken taipumat

Putkiin muodostuvat pysty- ja vaakasuuntaiset muodonmuutokset (taipumat) lasketaan molemmissa mitoitustavoissa CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 sekä lyhytaikaisessa, että pitkäaikaisessa tilanteessa. Pitkäaikaisessa tilanteessa mitoitus suoritetaan kappaleessa 3.8 esitettyllä tavalla jäykkyyksien ja laskentaperiaatteiden osalta. [15, kappale A.11.2] [4, kappale 8.4]

ATV-127 mukaisessa mitoituksessa taipumia laskettaessa kuormina huomioidaan vain maataytön ja liikennekuormien osuudet. Putkessa mahdollisesti olevan veden aiheuttama kuormitusta ei tarvitse huomioida, eikä sen laskentaa varten annetta kaavoja. [4, kappale 8.4]

CEN/TR 1295-3 mukaisessa taipuman laskennassa mahdollistetaan myös putken sisällä olevan veden ja putken alkumuodonmuutosten huomiointi maatäytön ja liikennekuormien vaikutusten lisäksi. [15, kappale A.11.2]

Putken sisällä olevan veden huomiointi taipumien laskennassa CEN/TR 1295-3 menetelmällä rajoittuu ohjeessa annettujen laskentakaavojen perusteella tilanteisiin, jossa putkessa ei ole vettä tai putki on täynnä vettä. Osittain veden täyttämille putkille ei esitetä laskentakaavoja. [15, kappale A.11.2.4]

CEN/TR 1295-3 menetelmällä taipumassa voidaan huomioida putkeen kohdistuva alkumuodonmuutos (initial ovalization), joka aiheutuu putken sivutäyttöjen teon ja tiivistyksen yhteydessä. Putken päällä ei ole maatäyttö ja sivuille tehtävä täyttötö ja tiivistys aiheuttaa putkeen vaakasuuntaista kuormaa, joka aikaan saa putkeen positiivista pystysuuntaista taipumaa (putken poikkileikkaus muuntuu pyöreästä pystysuuntaiseksi ovaaliksi). Alkumuodonmuutoksen suhteellinen suuruus putken alkuperäiseen halkaisijaan nähden voidaan laskea täyttömateriaalien ominaisuuksien, tiivistysluokan ja putken rengasjäykkyyden avulla. [15, kappale A.11.2.2]

CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmissä putkien pystysuuntaiset muodonmuutokset (taipumat) lasketaan toisiinsa nähden samalla periaatteella. Lukuun ottamatta kappaleessa 3.8 esitettyä poikkeavaa pitkäaikaistilanteen mitoitustapaa. Laskentakaavoissa huomioidaan tarvittavat kappaleessa 3.10 esitetyt mitoittavat kuormitukset  $q_i$ , kappaleessa 3.9 esitetyt kuormatyyppikohtaiset pystysuuntaiset muodonmuutuskertoimet  $c_{ii}$  ja kappaleen 3.2 mukaiset putken rengasjäykkyydet  $S_p$ . [15, kappale A.11.2] [4, kappale 8.4]

Vaakasuuntaisen muodonmuutoksen osalta CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmien mukaiset laskennat eroavat toisistaan. ATV-127 menetelmässä vaakasuuntainen muodonmuutos lasketaan vastaavalla tavalla kuin pystysuuntainen muodonmuutoskin, mutta muodonmuutuskertoimet  $c_{ii}$  korvataan vastaavilla vaakasuunnan kertoimilla. CEN/TR 1295-3 mukainen vaakasuunnan muodonmuutoksen laskenta perustuu kappaleessa 3.10 esitettyyn passiivipaineekuormaa kuvaavan  $q_h^*$  kuormituksen ja siihen liittyvien laskentatermien mukaiseen monimutkaisempaan menetelmään. [15, kappale A.11.3] [4, kappale 8.4]

### 3.13 Putken seinämän nurjahdus

CEN/TR 1295-3 menetelmässä putken kestävyys seinämän nurjahdusta (putken stabiiliiteetit menetystä) vastaan tulee tarkistaa kolmessa osassa. Nurjahdus tarkistetaan ensin ympärystäytön ja liikennekuormien kuormittamalle putkelle. Tämän jälkeen tarkastellaan

putken nurjahdus ulkoisen vedenpaineen (nostevoiman) kuormia vastaan. Näiden jälkeen tarkastellaan putken nurjahdus ympäristäytön ja liikennekuormien ja ulkoisen vedenpaineen yhteisvaikutuksille. Nurjahdus tarkastelun kelpoisuus todetaan vertaamalla putken seinämän kuormitusta putken seinämän kriittiseen nurjahduskuormaan ja näiden suhteen tulee täyttää nurjahdustarkasteluilta vaadittu kokonaisvarmuusluku. Nurjahdus tarkastellaan erikseen lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitustilanteissa. [15, kappale A.14]

ATV-127 menetelmän mukainen nurjahdustarkastelu suoritetaan CEN/TR 1295-3 vastaavalla tavalla. Menetelmien välillä ei ole eroavaisuuksia. Lukuun ottamatta laskenta-termien symbolieroja ja kappaleessa 3.8 käsiteltyä pitkäaikaisen mitoitustilanteen filosofiaa. [4, kappale 9.5]



## 4. VERTAILULASKENTA

### 4.1 Periaatteet

Tässä kappaleessa esitetään tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyt CEN/TR 1295-3 [15] ja ATV-127 [4] mukaisten mitoitusten vertailulaskelmat. Vertailulaskelmien tavoitteena on selvittää mitoitusten väliset erot mitoituksen lopputuloksen suhteen. Vertailulaskelmissa tutkitaan mitoitusten toisistaan poikkeavien kertoimien ja valittavien mitoitustietojen vaikutuksia laskennan lopputuloksiin.

Vertailulaskelmien tulosten perusteella tehdään tulkinnat siitä, että voidaanko molemmat mitoitustietojen ottaa rinnakkain käyttöön Väyläviraston tulevassa muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeessa ja millaisia valintoja parametrien ja kertoimien suhteen tulee tehdä, jotta yhdenmukaisuus menetelmien välillä saavutetaan.

Vertailulaskelmat suoritetaan tämän tutkimuksen tekijän laatimalla erillisellä Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla laaditulla laskentapohjalla.

Taivutusmomentteihin perustuvat vertailulaskelmat suoritetaan lyhytaikaisessa mitoitustilanteessa. Pitkäaikaisten taivutusmomenttien vertailu ei tuo tutkimukselle lisäarvoa kappaleessa 3.8 esitetyn mitoitustietojen välisen periaatteellisen eron takia. Taipumien ja käyttöasteiden vertailulaskennat suoritetaan molemmissa sekä lyhyt- että pitkäaikaisissa tilanteissa.

### 4.2 Putkien tiedot

Vertailulaskelmissa putkityyppinä käytetään komposiittiputkea. Valitun komposiittiputken materiaaliarvot noudattavat alla olevaa listausta.

- tilavuuspaino  $\gamma_P = 21,0 \text{ kN/m}^3$
- lyhytaikainen rengasjäykkyys  $SN_{ST} = 5000 \text{ N/m}^2$
- pitkäaikainen rengasjäykkyys  $SN_{LT} = 2500 \text{ N/m}^2$
- lyhytaikainen suhteellinen murtovenymä  $\Delta d_{frac}/d_m = 20,0 \%$
- pitkäaikainen suhteellinen murtovenymä  $\Delta d_{frac}/d_m = 12,0 \%$

Vertailulaskelmat suoritetaan kolmelle eri putkikoolle taulukon 12 mukaisesti.

Taulukko 12. Vertailulaskelmassa käytetyt putkikoot ja poikkileikkausarvot.

		D2000	D2500	D3000	
$d_e$	mm	2 045	2 555	3 065	Ulkohalkaisija
$d_i$	mm	1 983	2 477	2 973	Sisähalkaisija
$t$	mm	31	39	46	Seinämävahvuus
$A$	mm <sup>2</sup> /mm	31	39	46	Profiilin pinta-ala
$W$	mm <sup>3</sup> /mm	160	254	353	Profiilin taivutusvastus
$I$	mm <sup>4</sup> /mm	2 483	4 943	8 111	Profiilin neliömomentti

Edellä esitettyjen rengasjäykkyyksien ja putkikokojen avulla saadaan laskettua putkien laskennalliset kimmokertoimet, joita hyödynnetään myöhemmin putken ja maatyön yhteistoimintaa kuvaavien jäykkyysparametrien määrittämisessä. Kimmokertoimet määritetään kappaleessa 3.2 esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Taulukko 13. Vertailulaskelmassa käytetyt putkien laskennalliset kimmokertoimet.

		D2000	D2500	D3000	
$E_{p,ST}$	N/mm <sup>2</sup>	16 453	16 110	16 962	Lyhytaikainen kimmokerroin
$E_{p,LT}$	N/mm <sup>3</sup>	8 226	8 055	8 481	Pitkäaikainen kimmokerroin

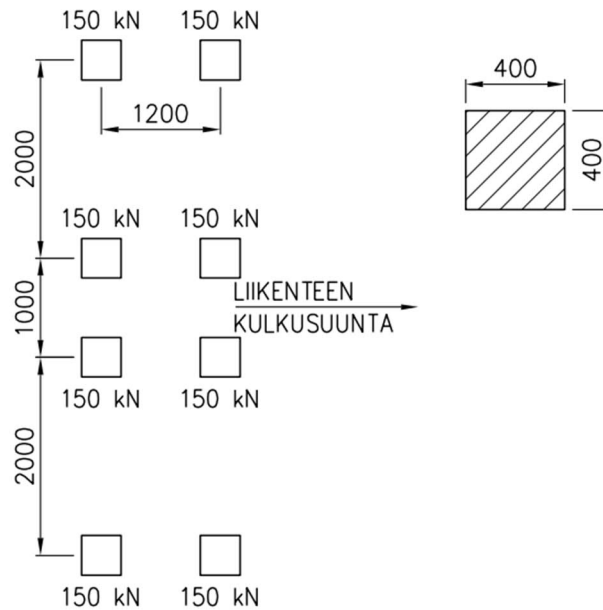
Laskennalliset kimmokertoimet vastaavat toisiaan, kuten pitääkin, kun tarkastellaan samaa rengasjäykkyyttä ja samaa materiaalia olevia putkia.

Putkien materiaalitiedot ja laskennalliset kimmokertoimet ovat mitoitusmenetelmästä riippumattomia ominaisuuksia.

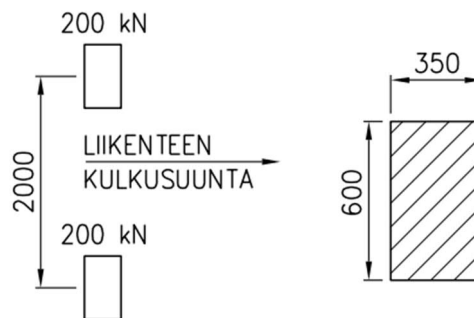
### 4.3 Liikennekuormat

Vertailulaskelmat toteutettiin ajoneuvoliikenteen kuormakaavioilla LM1, LM2 ja LM3 Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” mukaisesti. LM1 kuormakaavio muodostuu kahdesta ajoneuvoa kuvaavasta paikallisesta pyöräkuormamuodostelmasta (2 kpl \* 600 kN) ja tasaisesti jakautuneesta pintakuormasta (9 kN/m<sup>2</sup> kuormakaistalla 1, 6 kN/m<sup>2</sup> kuormakaistalla 2 ja 3 kN/m<sup>2</sup> muilla alueilla). LM2 muodostuu yhdestä kahta rengaskuormaa kuvaavasta telistä (2 kpl \* 200 kN). LM2 ei sisällä tasaisesti jakautunutta pintakuormaa. LM3 kuormakaavio muodostuu 45 kN/m<sup>2</sup> suuruisesta pintakuormasta. LM3 ei sisällä ajoneuvojen paikallisia rengaskuormia. LM1, LM2 ja LM3 kuormakaaviot eivät vaikuta samanaikaisesti. [9]

Kuvissa 14 ja 15 on esitettyä LM1 ja LM2 kuormakaavioiden rakenne ja pyöräkuormien väliset etäisyydet. Pyöräkuormille käytetään alla olevien kuvien mukaisia kosketuspintojen mittoja kuormien paikallisten vaikutusten selvittämisessä.



**Kuva 14.** Kuormakaavio LM1 rakenne, mitat ja pyöräkuormien kosketuspinnat.

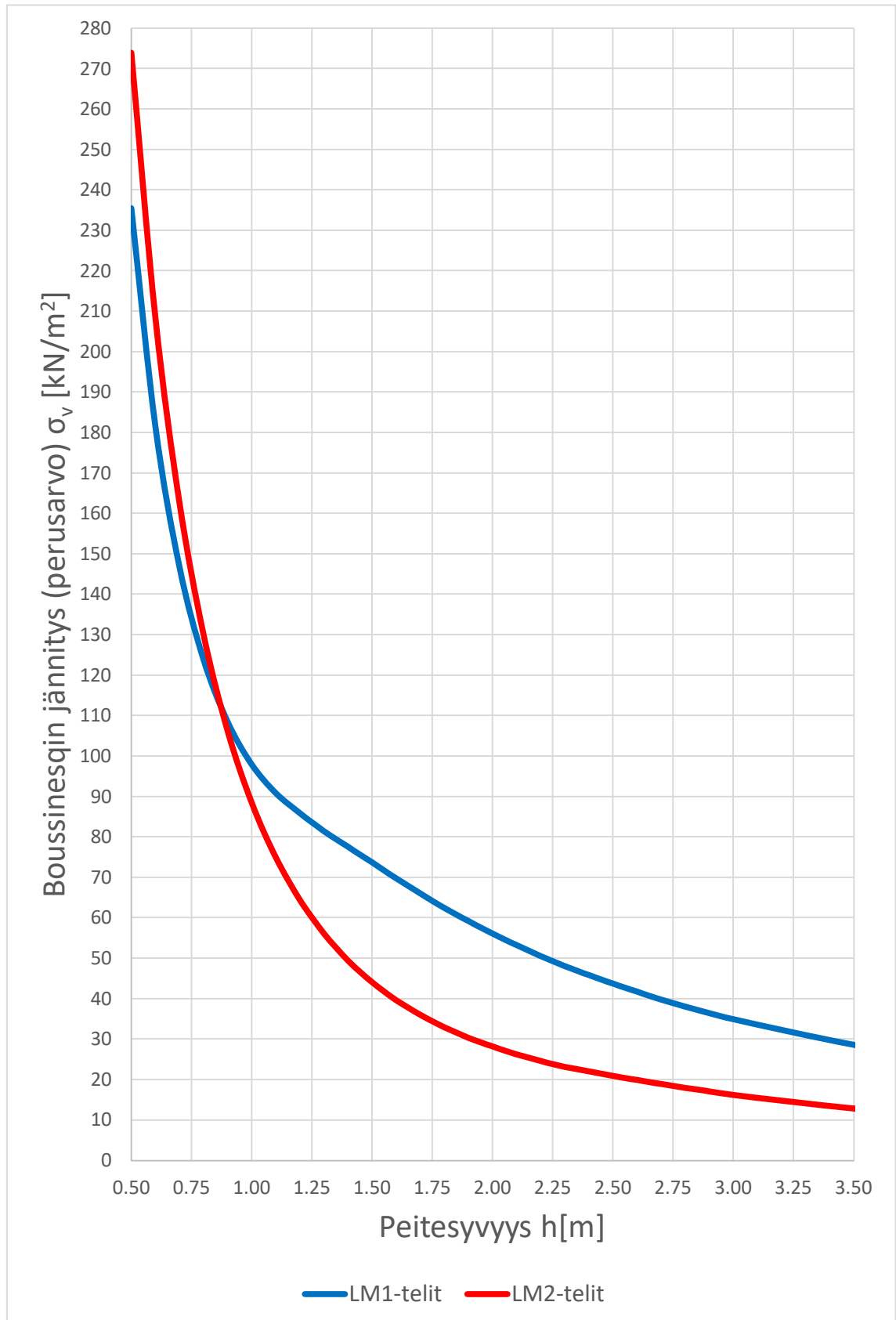


**Kuva 15.** Kuormakaavio LM2 rakenne, mitat ja pyöräkuormien kosketuspinnat.

Vertailulaskennassa tasaisesti jakautuneen kuorman oletetaan vaikuttavan maksimi-intensiteetillä (LM1 = 9 kN/m<sup>2</sup> ja LM3 = 45 kN/m<sup>2</sup>) koko liikennöidyn alueen leveydellä.

Pyöräkuormien vaikutukset maataytön läpi putken laelle lasketaan kappaleessa 3.3 esitetyllä tavalla Boussinesqin menetelmällä. Boussinesqin menetelmällä ratkaistaan suurin kuormituksen aiheuttama jännitys tarkasteltavassa syvyydessä. Tätä suurinta jännitystä käytetään tarkasteltavissa mitoitusmenetelmissä telikuormien arvona.

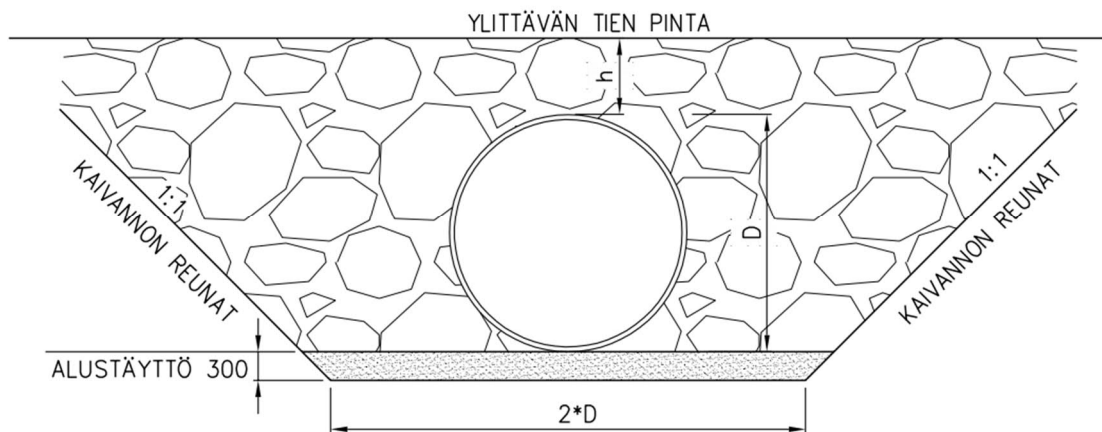
Tätä vertailulaskentaa ja myöhemmin Väyläviraston tulevaa muovi- ja komposiittiputkisoltojen suunnitteluohjeen helppokäyttöisyyttä varten tulee laatia taulukko liikennekuormien aiheuttamien jännitysten suuruuksista eri peittosyvyyksien suhteen. Kuvassa 16 on laskettu kuormakaavioiden LM1 ja LM2 telikuormien vaikutukset 0,5m...3,5m peittosyvyyksien suhteen mitoitusmenetelmien vertailulaskentaa varten. Kappaleessa 5.2 laaditaan suunnitteluohjeessa käytettävä kokonaisvaltaisempi taulukko.



**Kuva 16.** LM1 ja LM2 kuormakaavioiden pyöräkuormien aiheuttamat jännitykset putken laella peitesyvyyden suhteen.

#### 4.4 Maaparametrit

Vertailulaskelmissa tarkastellaan putkia, jotka asennetaan kaivantoon. Kaivannon mitat määritellään kuvan 17 mukaisesti. Kaivannon reunat tehdään 1:1 kaltevuuteen. Kaivannon leveys kaivannon pohjan tasolla valitaan kaksinkertaiseksi tarkasteltavan putken halkaisijaan nähden. Perustuksen alustäytön paksuudeksi valitaan 300 mm. Kaivanto noudattaa Väyläviraston ohjeen ”Teräsputkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” liitteen 2 perustamistavan B mukaista tilannetta [18].



**Kuva 17.** Vertailulaskennassa käytettävän kaivannon tiedot.

Kaikki vertailulaskennassa tarkasteltavat 3 putkikokoa mitoitetaan peitesyvyysvälillä 0,5m...3,5m. Tarkasteltavat peitesyvyydet ovat esitettynä alla olevassa listauksessa.

- välillä 0,5m...1,0m tarkastelut porrastetaan 0,1m välein
- välillä 1,0m...2,0m tarkastelut porrastetaan 0,2m välein
- välillä 2,0m...3,5m tarkastelut porrastetaan 0,25m välein

Kappaleessa 3 esitettyjen mitoitusperiaatteiden mukaisesti putkisillan toiminta perustuu sillan ja maan yhdessä aikaansaamaan liittorakenteeseen, jossa kuormat jakautuvat putkelle ja maalle niiden välisten jäykkyyssuhteiden perusteella.

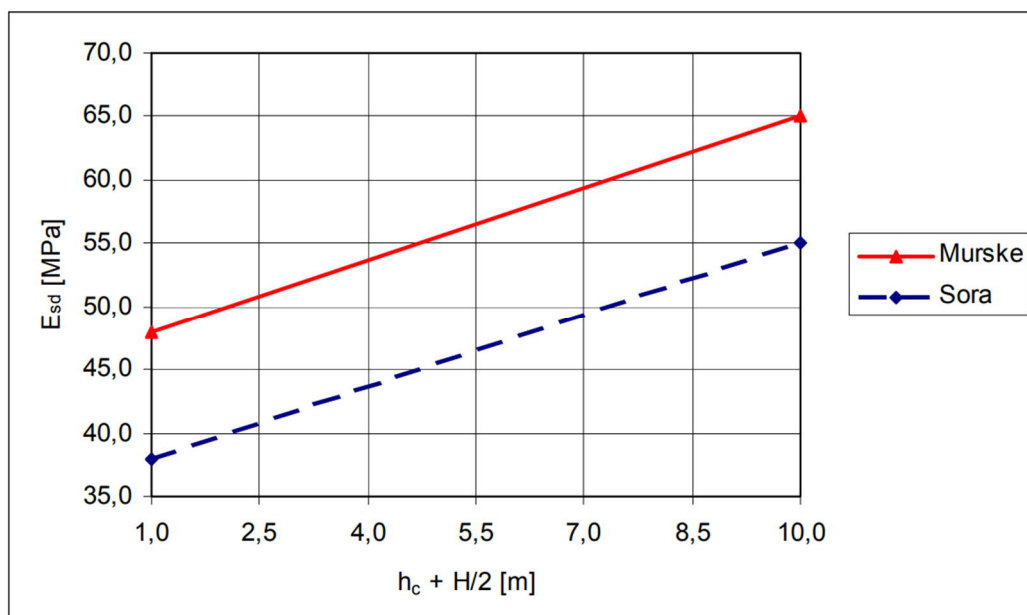
Väyläviraston ohjeissa ”Teräsputkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” [18] ja ”Teräsputkisillojen toteutusohje (LO 5/2016)” [19] esitetään Suomessa teräsputkisillojen yhteydessä käytettävät täyttömateriaalit ja annetaan niille mitoituksessa käytettävät ominaisuudet. Muovi- ja komposiittiputkisillojen yhteydessä käytetään samoja täyttömateriaaleja ja niiden ominaisuuksia. Täyttöjen toteutus tehdään vastaavasti edellä esitetyn teräsputkisillojen toteutusohjeen mukaisesti.

Vertailulaskelmissa maatyttö tarkasteltiin kahdella tavalla. Ensin tarkasteltiin sillan toiminta mursketäytöllä, jonka parannetuksi Proctor-tiiveydeksi valittiin 95 %. Tämän jälkeen vastaavat tilanteet tarkasteltiin soratäytöllä, jonka parannetuksi Proctor-tiiveydeksi valittiin 92 %. Näillä täyttömateriaaleilla saadaan selvillä rakenteiden toiminta ääritilanteissa täytön tiiveyden ja jäykkyyden suhteen. Taulukkoon 14 on listattuna käytettävien täyttömateriaalien maaparametrit. Muut laskennassa käytettävät täyttömateriaalien parametrit voidaan valita menetelmissä käytettävän "Soil Group 1" – maalajiluokituksen mukaisesti.

Taulukko 14. Murske- ja soratäyttöille käytettävät maaparametrit.

MAAPARAMETRIT	Kantavan tai jakavan kerroksen materiaali (murske Gp 0/63)	Jakavan kerroksen materiaali (luonnon sora)
Sisäinen kitkakulma $\varphi$ [°]	38	38
Tilavuuspaino $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	21	20
Pitkäaikaiskerroin $f_{R,T}$	1,00	1,00

Täyttömateriaalien tangenttimoduulit lasketaan peitesyvyyden ja putken halkaisijan avulla kuvan 18 perusteella täyttömateriaalille, jonka Proctor tiveys on 95 %. Mikäli 95 % ei saavuteta, tulee kuvaajasta saadut tangenttimoduulit redusoida tiiveysasteen mukaisella lisäkertoimella. 92 % Proctor-tiiveydellä redusointikertoimenä käytetään arvoa 0,65. Redusointikertoimet 92...95 % välillä voidaan interpoloida suoraviivaisesti. [18]



Kuva 18. Täyttömateriaalien tangenttimoduulien määrittäminen (Proctor 95%) [18].

Kuvaajan vaaka-akselin tunnus  $h_c$  tarkoittaa putken peitesyvyyttä ja  $H$  tarkoittaa putken laelta putken leveimpään kohtaan mitattua pystysuuntaista mitta. Pyöreän putken tapauksessa taulukossa esitetty termi  $H/2$  voidaan korvata termillä  $D/4$ , missä  $D$  tarkoittaa putken halkaisijaa.

Tähän asti todetut vertailulaskelmissa käytettävät mitoitusvalinnat putkien materiaalien, liikennekuorman perusjännityksen ja maaparametrien osalta ovat CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmien osalta samanlaiset. Ensimmäinen menetelmien välillä toisistaan poikkeava mitoitusvalinta tapahtuu ympäristäytöön liittyvien luokitusten kanssa. Luokitusten erot ja niiden tunnuksot ovat esiteltyinä kappaleessa 3.4.

Tässä vertailulaskennassa luokituksiksi valitaan CEN/TR 1295-3 mukaisessa laskennassa ET1a (Embedment type) ja I1 (Installation condition). ATV-127 mukaiseen laskentaan valitaan luokat A1 (Covering condition) ja B1 (Embedding condition). Luokituksia ei muuteta vertailulaskennan aikana. Valitut luokitukset kuvaavat tyypillisintä putkisillan ympäristäyttöä ja antavat täten todenmukaisimmat tulokset vertailulaskennalle. Muut ympäristäyttöluokitukset kuvaavat harvinaisempia tilanteita, kuten esimerkiksi ponttiseiniin väliin asennettavia putkisilloja tai suoraan betonivalun päälle asennettavia putkisilloja.

Valitut luokitukset kuvaavat tilannetta, jossa putkien sivuille ja päälle tehtävät täytöt ovat samaa materiaalia, mutta kaivannon pohjamaa säilytetään alkuperäisenä eikä sen tiiveyttä saada varmistettua työn aikana. Näin ollen putken alapinnan tuennan kulmaksi muodostuu molemmissa mitoitusmenetelmissä  $120^\circ$  (kun CEN/TR 1295-3 menetelmässä käytetään ympäristäytön tiiveytenä luokkaa W "well compacted material"). Tämä kuvaa tilannetta, jossa putken reunojen alle tulevaa täyttöä ei päästä fyysisesti tiivistämään kunnolla, jolloin se ei myöskään aikaansaa vastaavaa tuentaa kuin putken pohjan alla oleva täyttö. Lisäksi molemmissa mitoitusmenetelmissä maan ja putken väliseksi kitkakertoimeksi  $\delta$  oletetaan tällöin 2/3-osaa täydestä täyttömateriaalin kitkakulmasta  $\varphi$ . Pohjamaan tiiveyden mittaaminen saattaa osoittautua hankalaksi esimerkiksi joen uomaan asennettavien putkien kohdalla, jolloin sen tiiveyden mittaustuloksiin saattaa jäädä epävarmuustekijöitä.

Molemmat mitoitusmenetelmät mahdollistavat myös luokitusten valinnan niin, että putken alle tehtävä alustäyttö korvaa luonnontilaisen pohjamaan. Tällöin oletetaan myös, että pohjan tiiveysvaatimus saadaan luotettavasti mitattua. Näissä tapauksissa putken alapinnan tuentakulmaksi voidaan olettaa  $180^\circ$  ja maan ja putken väliseksi kitkakulmaksi redusoimaton täyttömateriaalin kitkakulma  $\varphi$ . Luokitukset ovat CEN/TR 1295-3 mukaan tällöin ET2 ja I1. Vastaavat ATV-127 luokitukset ovat A4 ja B4.

Tätä mahdollisuutta ei kuitenkaan hyödynnetä näissä vertailulaskelmissa. Edellä mainituista syitä johtuen luokitukset ET1a+I1 ja A1+B1 koetaan tämän tutkimuksen yhteydessä todenmukaisemmiksi. Valituilla luokituksilla (heikommalla tuennalla) saadaan laskentaan lisävarmuutta. Lisävarmuus on tervetullutta, kun ollaan tekemisissä uuden materiaalin kanssa siltarakenteissa. Tulevaisuudessa parempien luokitusten käyttöä voidaan harkita, kun saadaan lisää käytännön kokemuksia muovi- ja komposiittiputkisiltojen toiminnasta ja niiden suhteesta mitoitus tuloksiin.

#### **4.5 Tiivistysluokan vaikutus**

Tässä kappaleessa tarkastellaan CEN/TR 1295-3 mukaisten ympärystätön tiivistysluokkien vaikutusta putkeen muodostuvien taivutusmomenttien suhteen.

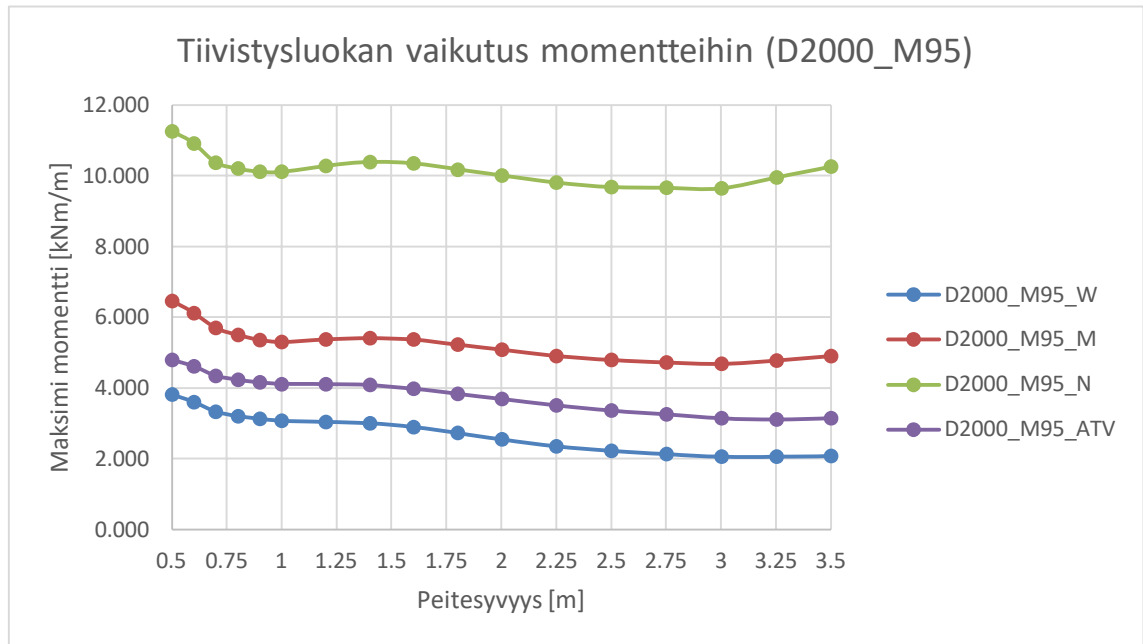
Kappaleessa 3.5 esitetyn mukaisesti CEN/TR 1295-3 mahdollistaa kolmen eri tiivistysluokan valinnan ympärystätölle. Tiivistysluokat ovat ”well compacted material”, ”moderately compacted material” ja ”non-compacted”.

Kun muovi- ja komposiittiputkisiltojen ympärystätöt tehdään Väyläviraston ohjeissa ”Teräsputkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” [18] ja ”Teräsputkisiltojen toteutusohje (LO 5/2016)” [19] esitettyjen vaatimusten mukaisesti, voidaan ympärystätön tiivistysluokaksi valita W ”well compacted material”.

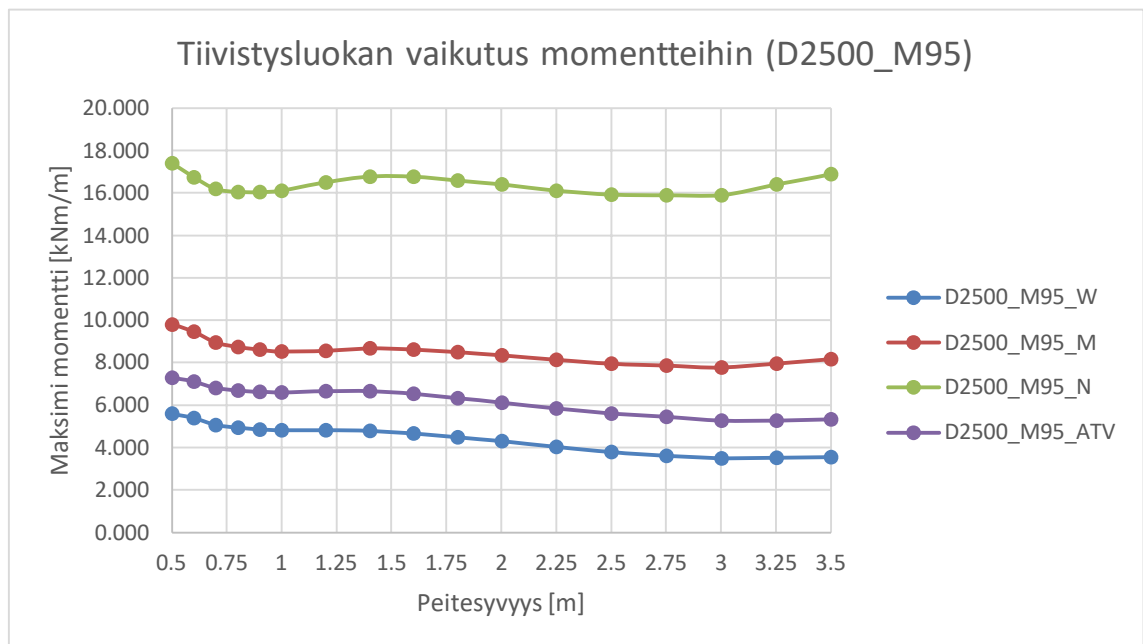
ATV-127 mukaisessa mitoitusmenetelmässä ei ole mahdollista vaikuttaa ympärystätön tiivistyksen tasoon. ATV-127 mukainen mitoitus etenee tältä osin vakiokertoimilla.

Kuvissa 19, 20, 21, 22, 23 ja 24 on esitettyinä putkeen muodostuvat suurimmat taivutusmomenttirasitukset eri peittosyvyyksillä, ympärystätön materiaaleilla ja tiivistysluokilla putkikoittain.

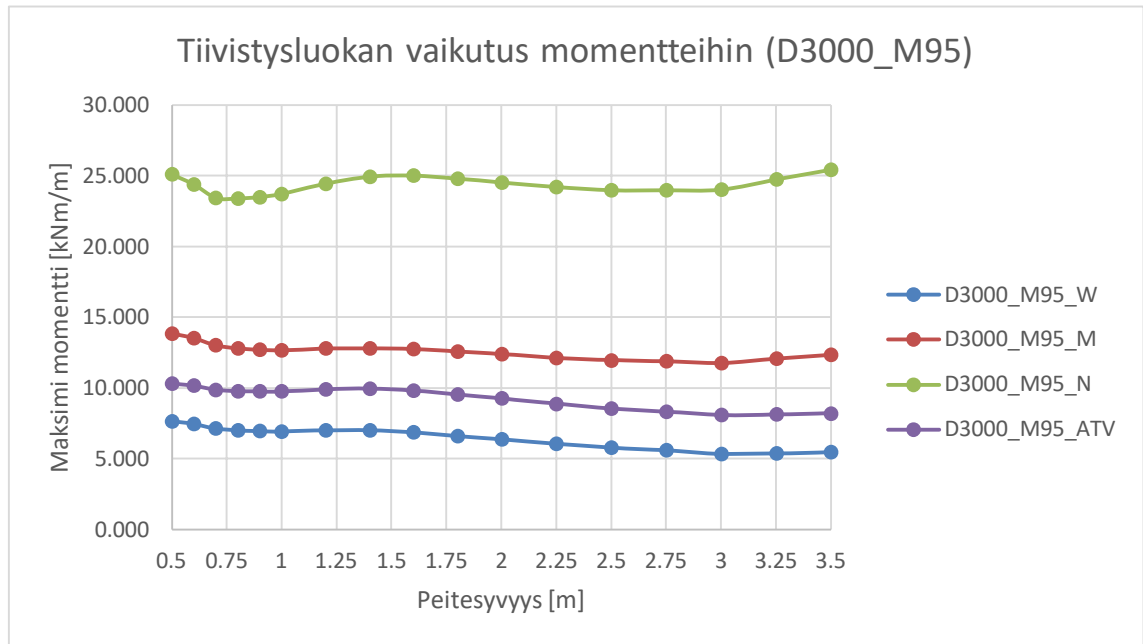




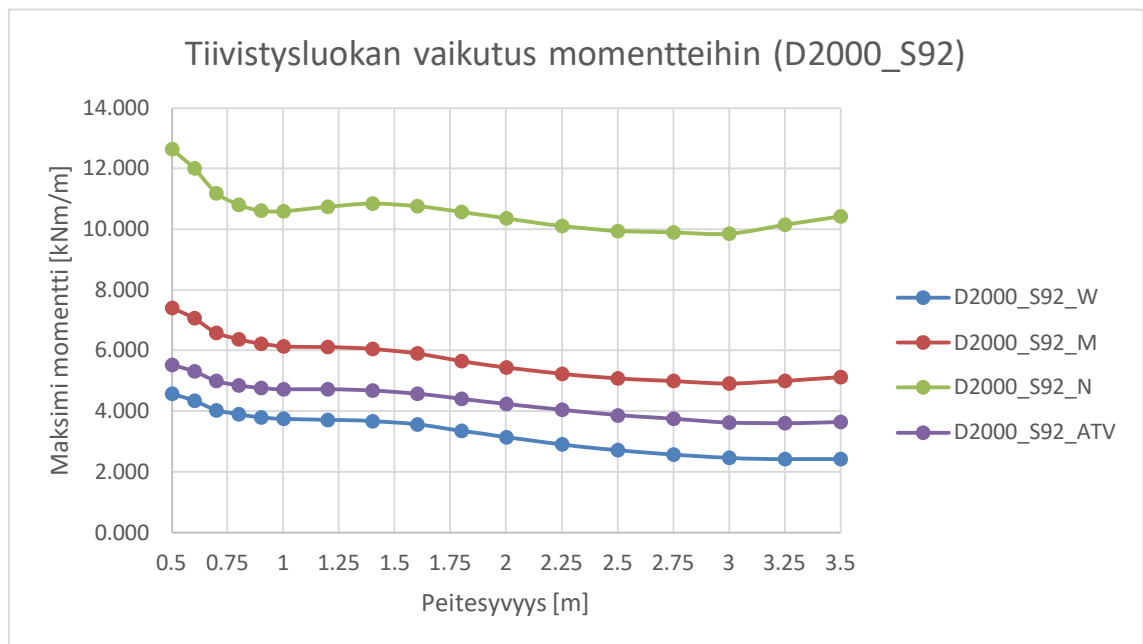
**Kuva 19.** Tiivistysluokan vaikutus putken momentteihin. Putken koko D2000 ja ympärystäytönä murske 95%.



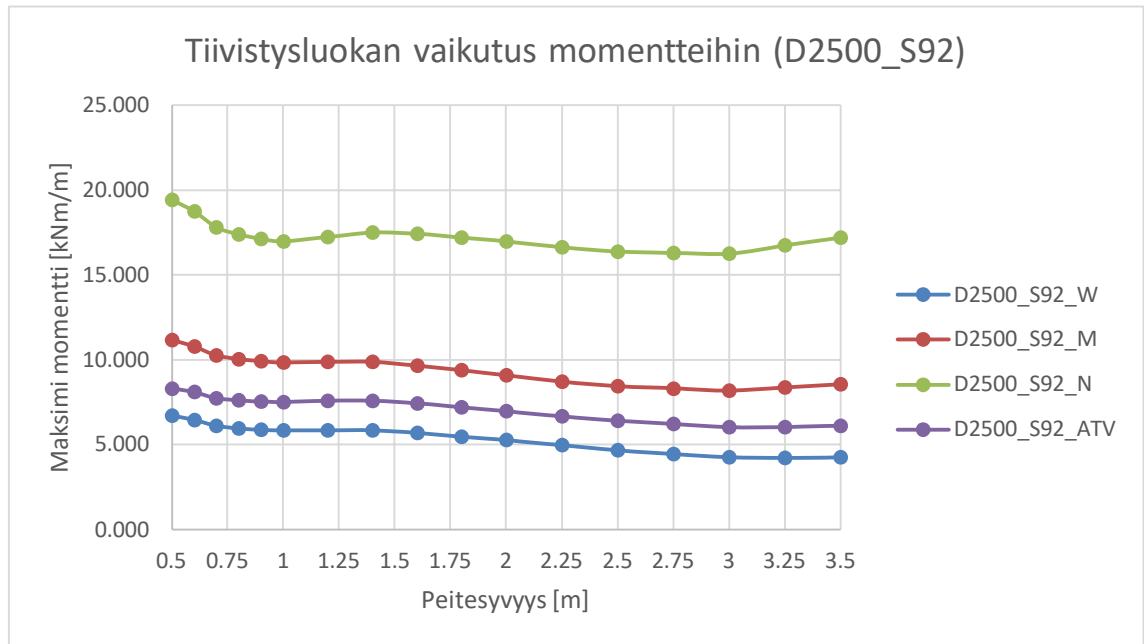
**Kuva 20.** Tiivistysluokan vaikutus putken momentteihin. Putken koko D2500 ja ympärystäytönä murske 95%.



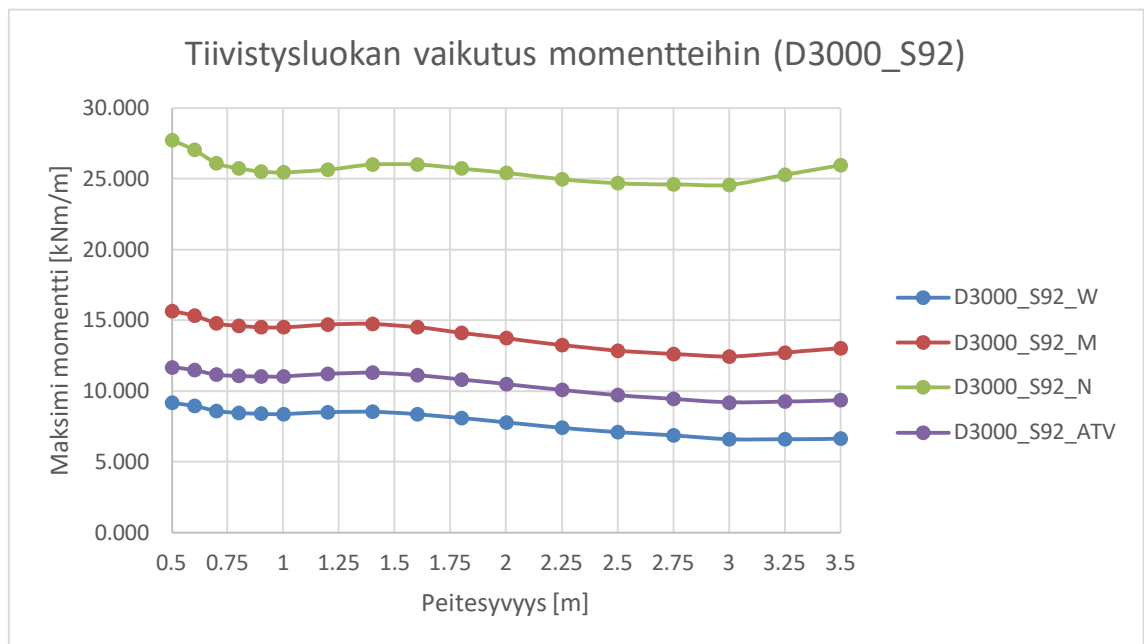
**Kuva 21.** Tiivistysluokan vaikutus putken momentteihin. Putken koko D3000 ja ympärystäytönä murske 95%.



**Kuva 22.** Tiivistysluokan vaikutus putken momentteihin. Putken koko D2000 ja ympärystäytönä sora 92%.



**Kuva 23.** Tiivistysluokan vaikutus putken momentteihin. Putken koko D2500 ja ympärystäytönä sora 92%.



**Kuva 24.** Tiivistysluokan vaikutus putken momentteihin. Putken koko D3000 ja ympärystäytönä sora 92%.

Havaintoja edellä esitetyistä tiivistysluokan vaikutuksia esittäivistä momenttikuvaajista:

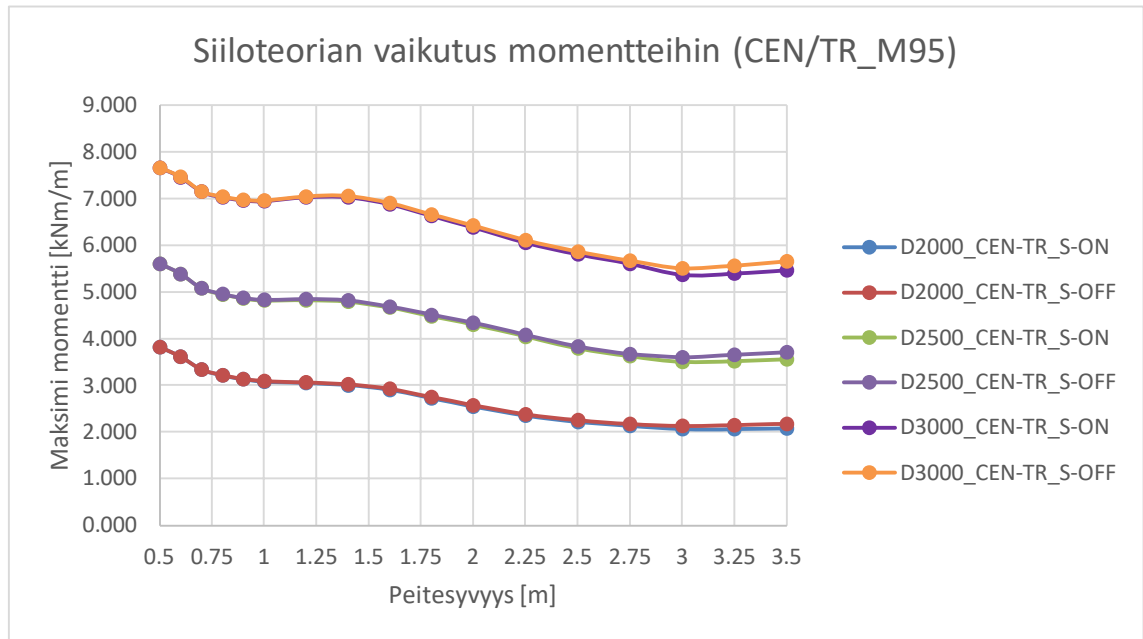
- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia eivätkä risteä toistensa kanssa. Tiivistysluokkien valinta vaikuttaa momenttien suuruuteen kokonaisvaltaisesti samalla tavalla peittosyvyydestä, putken koosta ja ympärystytön materiaalista (putken ja täytön jäykkyyssuhteesta) riippumatta.
- Heikompia tiiveyksiä kuvaavien tiiveysluokkien valinta kasvattaa momenttirasi-tuksia huomattavasti ja näin ollen tukee kappaleessa 3.1 mainittua tiivistystyön onnistumisen merkitystä rakenteen toimivuuden kannalta.
- ATV-127 mukaisen mitoituksen taivutusmomentit asettuvat jokaisessa lasken-nassa CEN/TR 1295-3 mukaisten "Well" ja "Moderate" luokitusten välille. Mo-menttikuvaajien yhdenmuotisuus tukee myös tavoitetta käyttää molempia mitoi-tusmenetelmiä rinnakkain tulevassa Väyläviraston suunnitteluohjeessa.

Seuraavien kappaleiden vertailulaskennoissa käytetään CEN/TR 1295-3 mukaiselle mi-toitusmenetelmällä aina tiivistysluokkaa W "well compacted material".

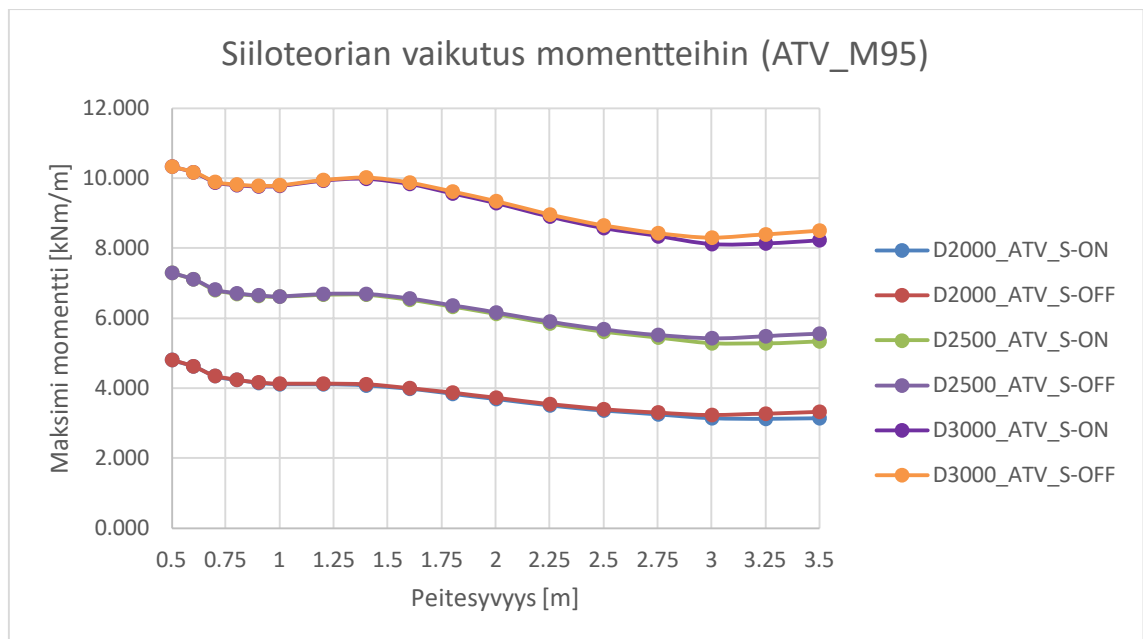
## 4.6 Siiloteorian vaikutus

Tässä kappaleessa tarkastellaan siiloteorian huomioimisen vaikutuksia putkeen muo-dostuviin taivutusmomentteihin. Siiloteorian mukaisia periaatteita on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.7. CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mitoitussuunnitelmässä siiloteoria huomioi-daan identtisellä tavalla laskennassa käytettävien symbolien merkintäeroja lukuun otta-matta.

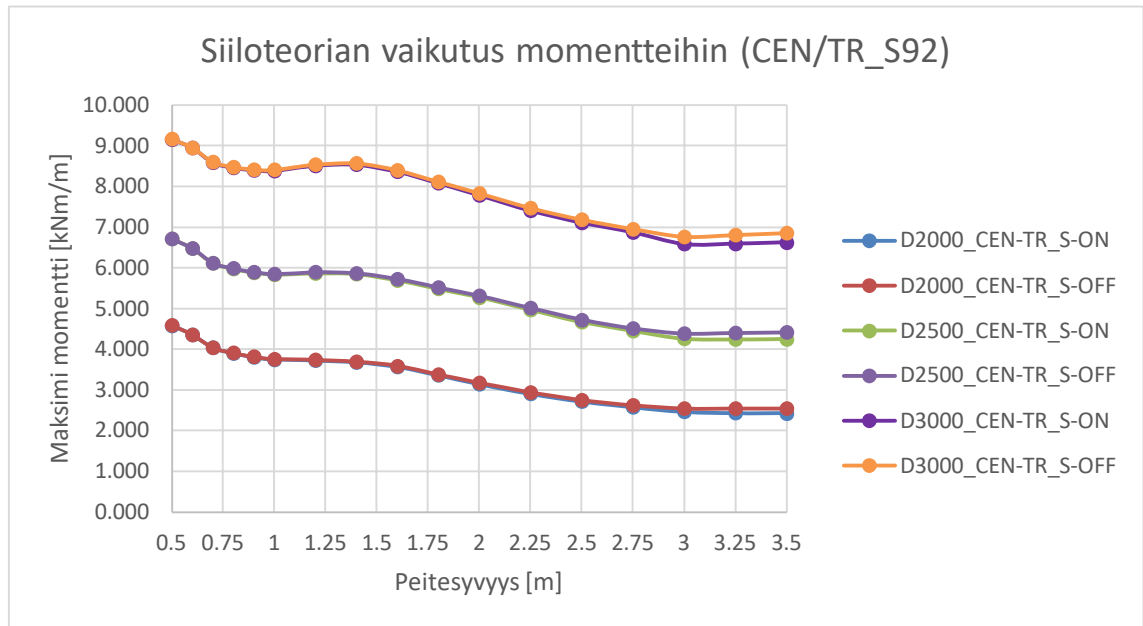
Kuvissa 25, 26, 27 ja 28 on esitettyä putkeen muodostuvat suurimmat taivutusmoment-tirasitukset eri peittosyvyyksillä ja ympärystytön materiaaleilla putkikoittain siiloteoriaa hyödyntäen ja ilman siiloteoriaa.



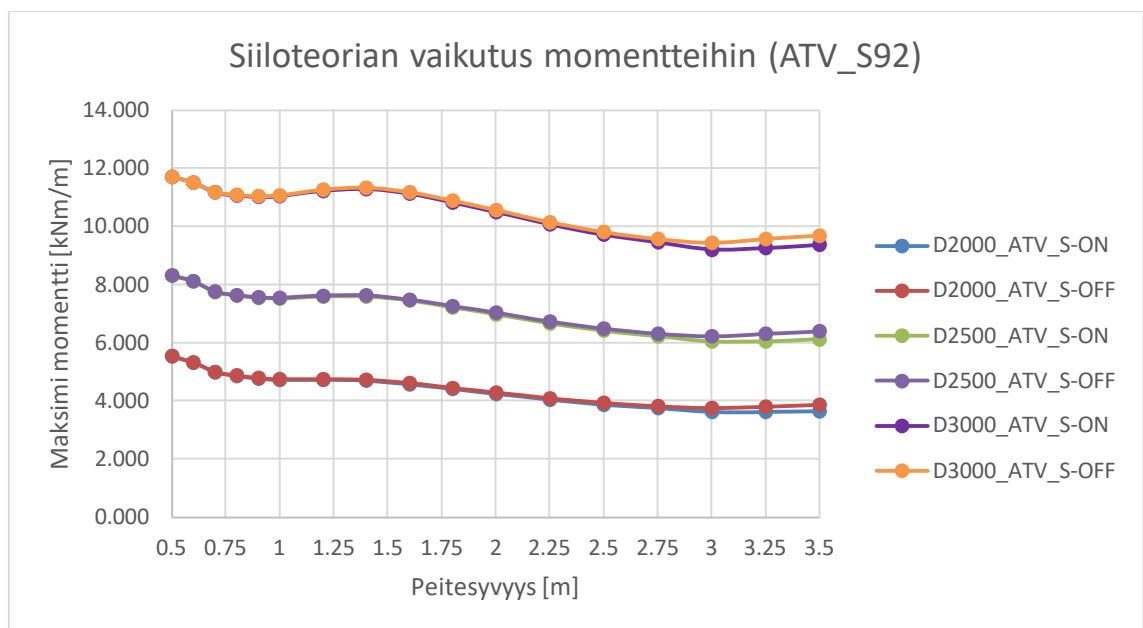
**Kuva 25.** Siiloteorian vaikutus putkien momentteihin. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäyttönä murske 95%. Mitoitusmenetelmänä CEN/TR 1295-3.



**Kuva 26.** Siiloteorian vaikutus putkien momentteihin. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäyttönä murske 95%. Mitoitusmenetelmänä ATV-127.



**Kuva 27.** Siiloteorian vaikutus putkien momentteihin. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäytönä sora 92%. Mitoitusmenetelmänä CEN/TR 1295-3.



**Kuva 28.** Siiloteorian vaikutus putkien momentteihin. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäytönä sora 92%. Mitoitusmenetelmänä ATV-127.

Havaintoja edellä esitetyistä siiloteorian vaikutuksia esittävistä momenttikuvaajista:

- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia ja siiloteorian aikaan saamat edut jäävät kaikissa vähäisiksi. Putken koolla ja ympärystäytön materiaalilla ei ole havaittavissa olevaa vaikutusta siiloteorian vaikutuksiin.
- Siiloteorian vaikutus alkaa nähtyä rakenteen momenteissa vasta 3 m peittosyvyyden kohdalla ja tätä suuremmilla peittosyvyyksillä.
- Siiloteorian vaikutus perustuu kaivannon reunojen kaltevuuteen, kaivannon leveyteen ja peittosyvyyden suuruuteen. Kaivannon reunojen kaltevuus on tyypillisesti 1:1 tai loivempi, jolloin siiloteorian vaikutus vähenee. Kaivannon leveys määräytyy Väyläviraston ohjeen ”Teräsputkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” liitteen 2 perustamistapojen mukaisesti [18], jolloin kaivannon leveys pohjalla on aina vähintään  $2 \cdot D$ . Kaivannon leveyden ja peittosyvyyden suhteen myötä siiloteorian vaikutus vähenee lisää. Siltakokoluokan putkissa ( $D \geq 2\text{m}$ ) siiloteorian vaikutus jää vähäiseksi kaikilla tavanomaisilla peittosyvyyksillä.
- Siiloteorian mukaiset vaikutukset ATV-127 ja CEN/TR 1295-3 mukaisiin taivutusmomentteihin vastaavat toisiaan. Momenttikuvaajien yhdenmuotisuus tukee tavoitetta käyttää molempia mitoitusmenetelmiä rinnakkain tulevassa Väyläviraston suunnitteluohjeessa.

Seuraavien kappaleiden vertailulaskennoissa käytetään siiloteorian mukaisia vähennyskertoimia.

## 4.7 Päällysteen jäykkyyden vaikutus

Tässä kappaleessa tarkastellaan CEN/TR 1295-3 mukaisten päällysteen kuormien levittämiskykyjen vaikutuksia putkeen muodostuvien taivutusmomenttien suhteen.

CEN/TR 1295-3 mahdollistaa kolmen eri päällysteluokan valinnan. Päällysteluokat ovat ”rigid pavements”, ”flexible pavements” ja ”non paved formations”. Päällysteluokan valinta vaikuttaa suoraan liikennekuormien suuruuteen. Laskennallinen liikennekuorman pystysuuntainen kuormitus kerrotaan päällysteen huomioivalla kertoimella  $D_{T,mod}$ . Kertoimien suuruudet päällystetyypeittäin:

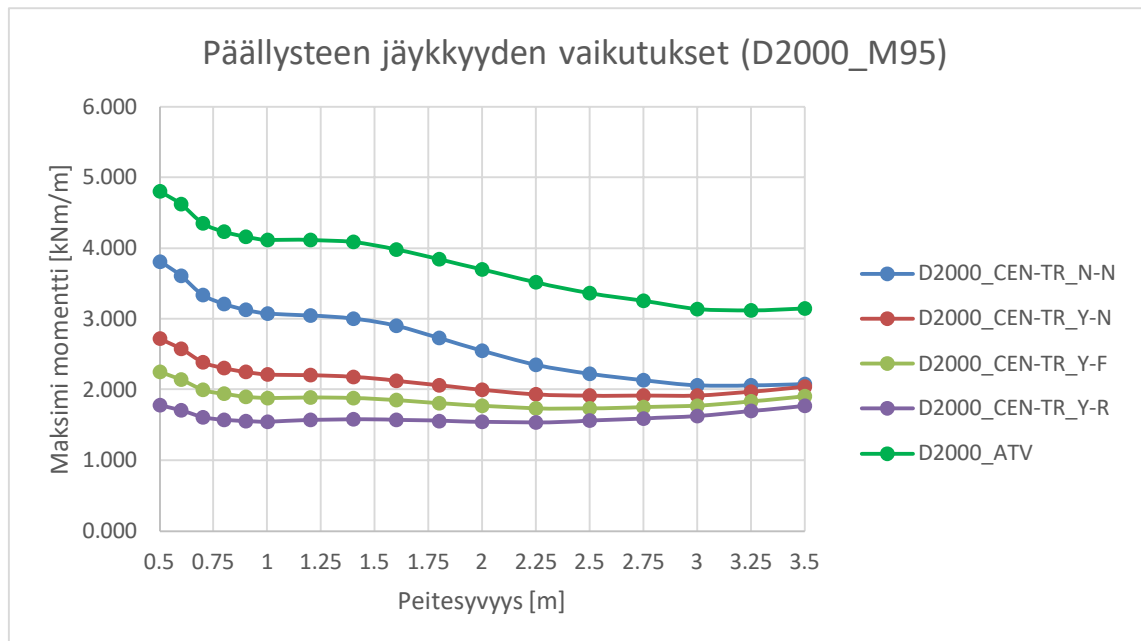
- rigid pavements  $D_{T,mod} = 0,6$
- flexible pavements  $D_{T,mod} = 0,8$
- non paved formations  $D_{T,mod} = 1,0$

Lisäksi päällysteluokalla on vaikutus myös putken sivuille liikennekuormasta aiheutuvaan vaakasuuntaiseen kuormitukseen. Tässä yhteydessä valinta tapahtuu päällystetyn ja päällystämättömän pintarakenteen välillä edellä mainittujen kolmen luokituksen sijasta.

ATV-127 mukaisessa mitoitusmenetelmässä ei ole mahdollista vaikuttaa päällysteen kuormia jakaviin ominaisuuksiin. ATV-127 mukainen mitoitus etenee tältä osin vakiokaavoilla, jotka vastaavat CEN/TR 1295-3 mukaista päällystämätöntä pintarakennetta. Liikennekuormia ei näin ollen redusoida päällysteen jäykkyyden mukaisesti ATV-127 mitoitusmenetelmässä.

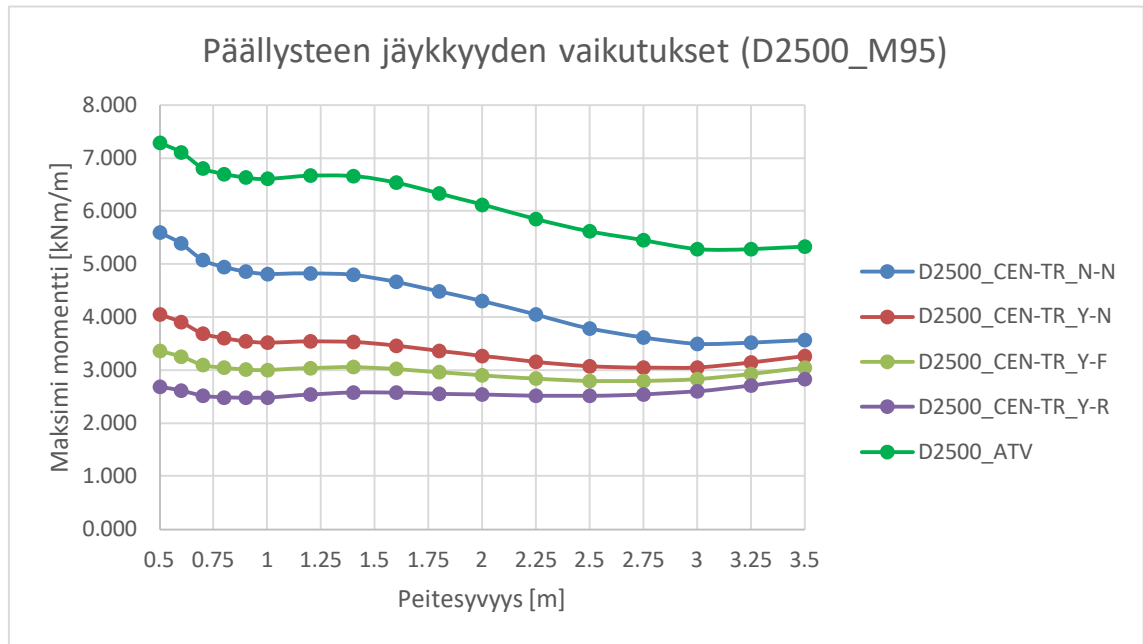
Kuvissa 29, 30, 31, 32, 33 ja 34 on esitettyinä putkeen muodostuvat suurimmat taivutusmomenttirasitukset eri peittosyvyyksillä, ympärystäytön materiaaleilla ja päällysteen jäykkyyksillä putkikoittain. Kuvaajien selitteissä on käytetty tunnuksia seuraavasti:

- Ensimmäinen kirjain kuvaa onko pintarakenne päällystetty (Y) vai päällystämätön (N). Valinta vaikuttaa liikenteestä aiheutuvaan vaakasuuntaiseen kuormaan edellä esitetyllä tavalla.
- Toinen kirjain kuvaa pintarakenteen jäykkyydenluokitusta. Rigid pavements (R), Flexible pavements (F) ja Non paved formations (N). Valinta vaikuttaa  $D_{T,mod}$  kertoimen avulla pystysuuntaiseen liikennekuorman suuruuteen.

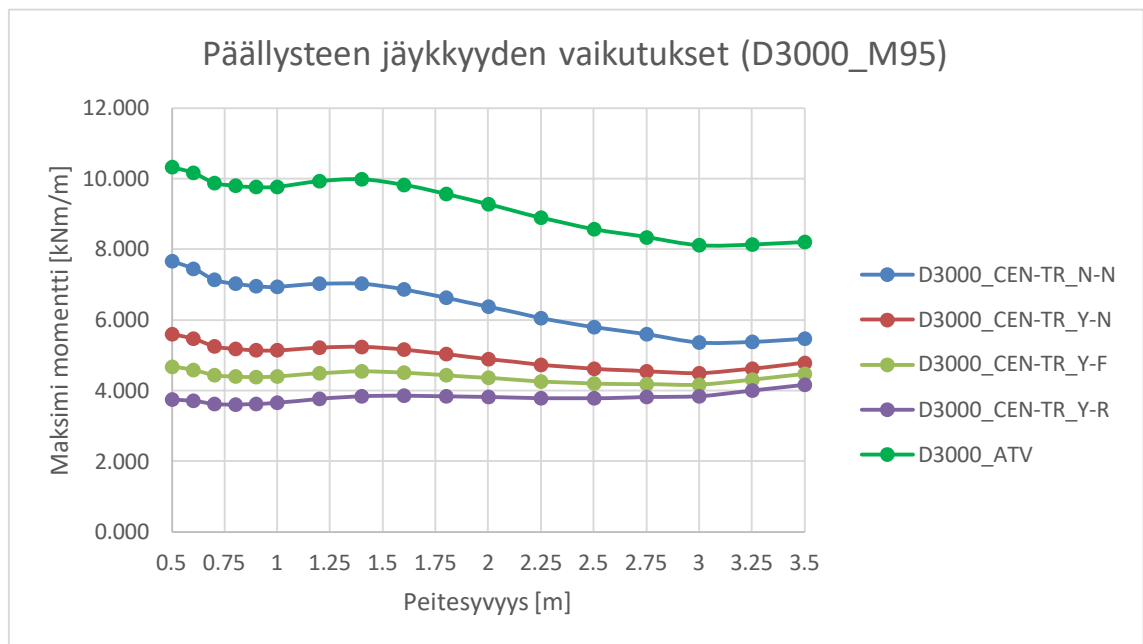


**Kuva 29.** Päällysteen jäykkyyden vaikutus putkien momentteihin. Putken koko D2000 ja ympärystäytönä murske 95%.

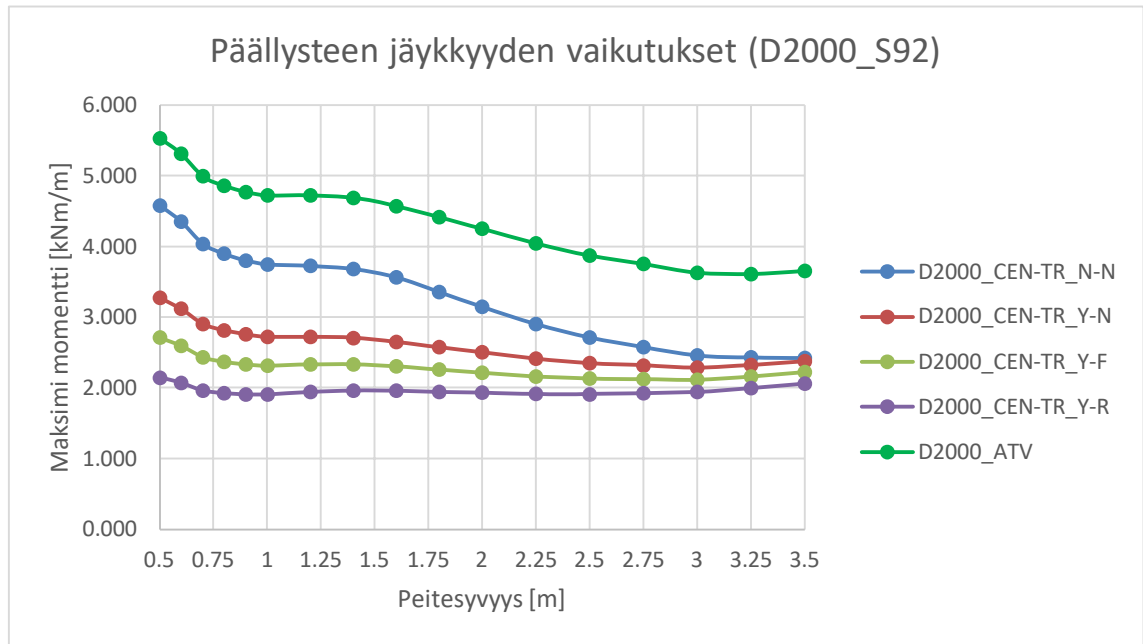




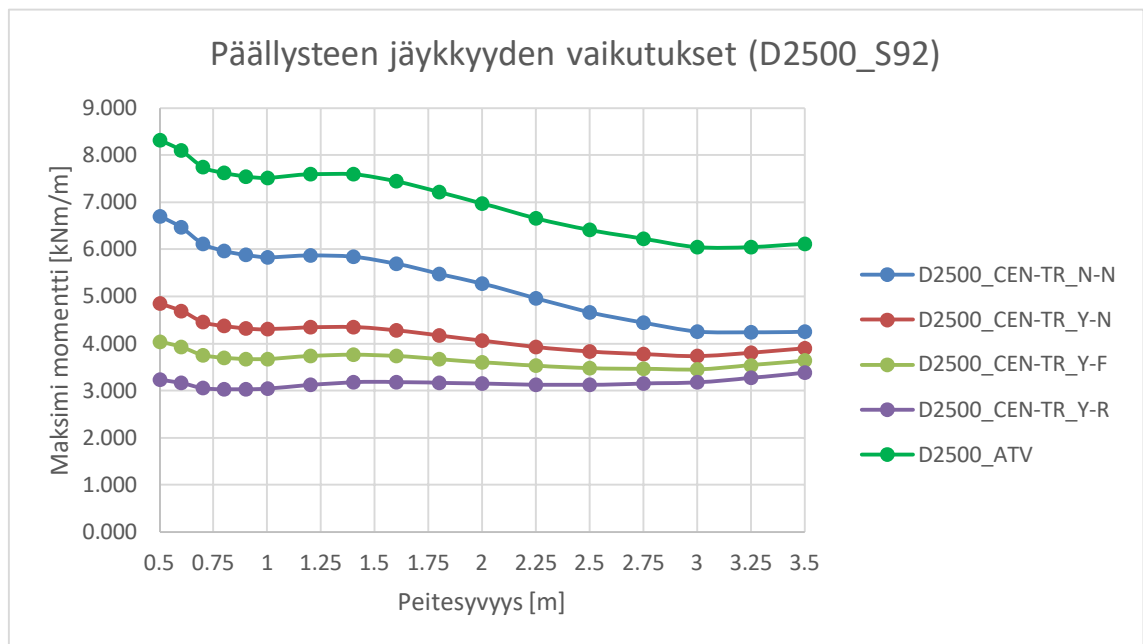
**Kuva 30.** Päällysteen jäykkyyden vaikutus putkien momentteihin. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä murske 95%.



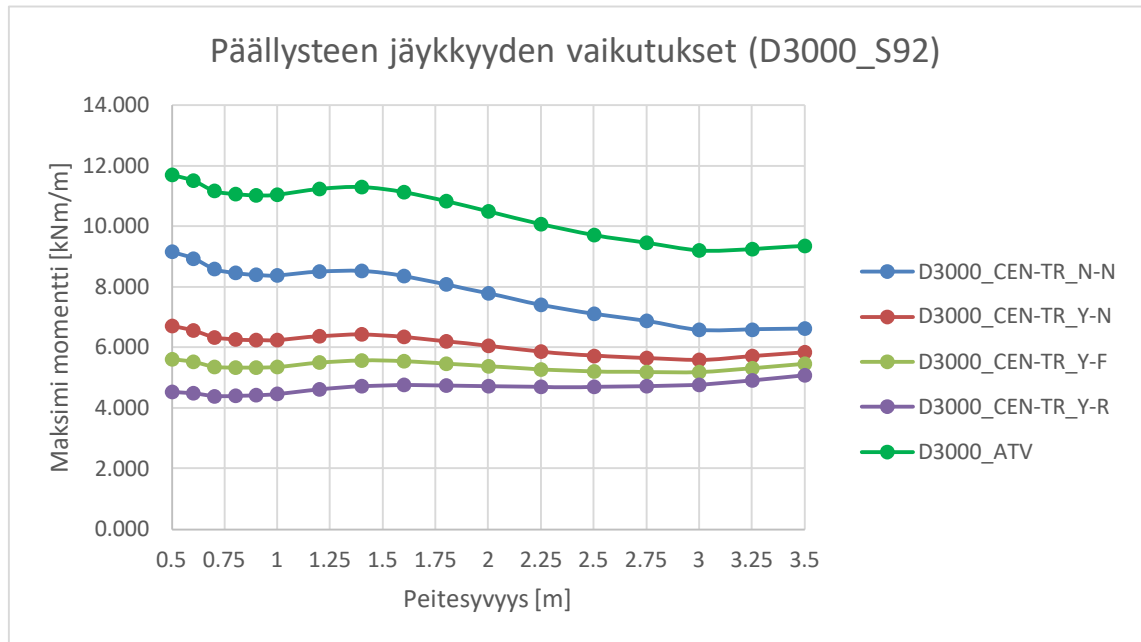
**Kuva 31.** Päällysteen jäykkyyden vaikutus putkien momentteihin. Putken koko D3000 ja ympäristäytönä murske 95%.



**Kuva 32.** Päällysteen jäykkyyden vaikutus putkien momentteihin. Putken koko D2000 ja ympärystäytönä sora 92%.



**Kuva 33.** Päällysteen jäykkyyden vaikutus putkien momentteihin. Putken koko D2500 ja ympärystäytönä sora 92%.



**Kuva 34.** Päällysteen jäykkyyden vaikutus putkien momentteihin. Putken koko D3000 ja ympärystyttönä sora 92%.

Havaintoja edellä esitetyistä päällysteen jäykkyyden vaikutuksia esittävästä momenttikuvaajista:

- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia. Päällysteen jäykkyyden vaikutukset pienentävät rakenteeseen muodostuvia momenteja mitä jäykempi ja enemmän kuormia jakava päällystetyyppi valitaan.
- Päällysteen vaikutus momentteihin vähenee peitesyvyyden kasvaessa ja momenttien arvot lähestyvät päällystämätöntä tilannetta. Vastaavasti myös liikennekuormien osuus kokonaismomentista vähenee peitesyvyyden kasvaessa, joka osaltaan selittää myös päällysteen vaikutuksen vähentymistä. Putken koon kasvattaminen hidastaa päällysteen jäykkyyden vaikutusten heikentymistä peitesyvyyden suhteen.
- Jäykempien ja tehokkaammin kuormia levittävien päällysteiden kanssa putkiin muodostuvat momentit eroavat ATV-127 mukaisista momenteista entisestään. Päällysteen vaikutus laskennallisisiin momentteihin on suhteessa suuri ja päällysteen todellista kuormia jakavaa vaikutusta on hankala todentaa. CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mukaisten mitoitusmenetelmien yhdenmukaisen laskennan kannalta on selkeämpää ohittaa päällysteen jäykkyyden mahdollistamat kuormien

redusoinnit todellisesta päällysteestä riippumatta. Valitsemalla redusointikertoimien suuruuksiksi 1,0, mitoitusmenetelmät yhdenmukaistuvat ja laskennalliset momentit pysyvät varmalla puolella redusoituihin momentteihin verrattuna.

- Tulevaisuudessa, kun muovi- ja komposiittiputkisilloista on saatu kerättyä enemmän käytännön kokemuksia ja todellista käyttäytymistä pystytään vertaamaan laajemmin laskennallisiin tuloksiin, voidaan niiden pohjalta myös uudelleen harhita päällysteen jäykkyyden suhteen tehtäviä valintoja. Toistaiseksi jäykkyyden redusoinnin pois jättämisellä saadaan lisävarmuutta uuden siltamateriaalin kanssa toimimiseen.

Seuraavien kappaleiden vertailulaskennoissa käytetään päällysteiden luokitukselle luokka ”non paved formations”, jolloin pystysuuntaisten liikennekuormien kertoimen  $D_{T,mod}$  arvo on 1,0. Lisäksi pintarakenne oletetaan päällystämättömäksi liikenteen aiheuttamia vaakakuormituksia määritettäessä.

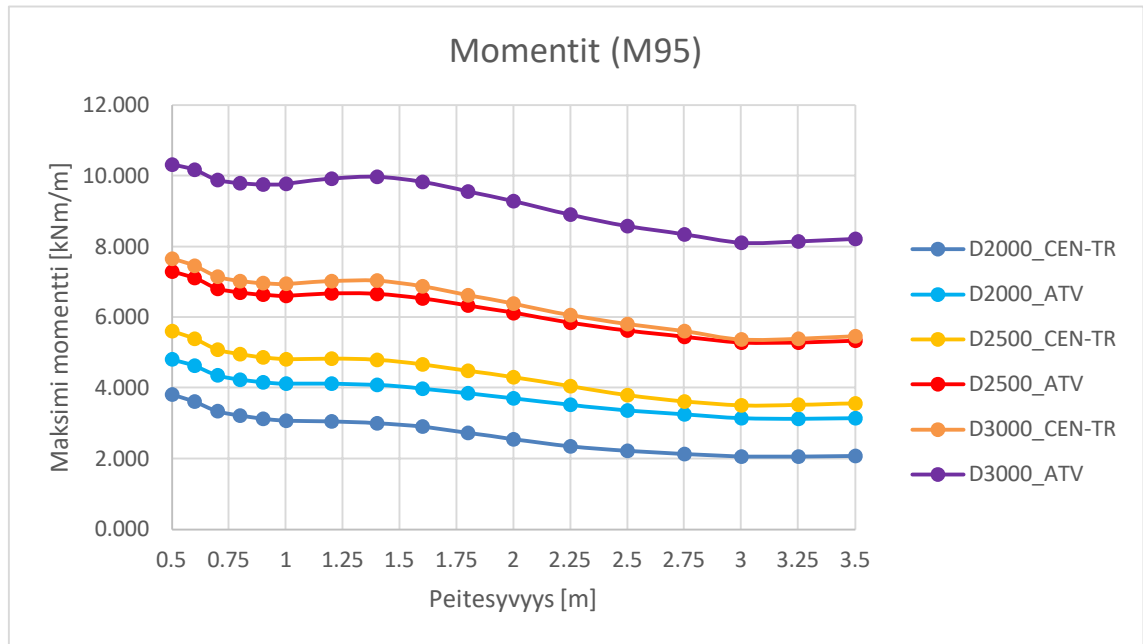
#### 4.8 Momentit ja normaalivoimat

Tässä kappaleessa vertaillaan yhteenvedona CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mukaisten mitoitusmenetelmien aikaan saamia putken momentteja ja normaalivoimia huomioiden aiemmissa kappaleissa tehdyt päätökset mitoitusvalintojen suhteen. Tarkasteltavaksi mitoitus valinnoiksi valittiin:

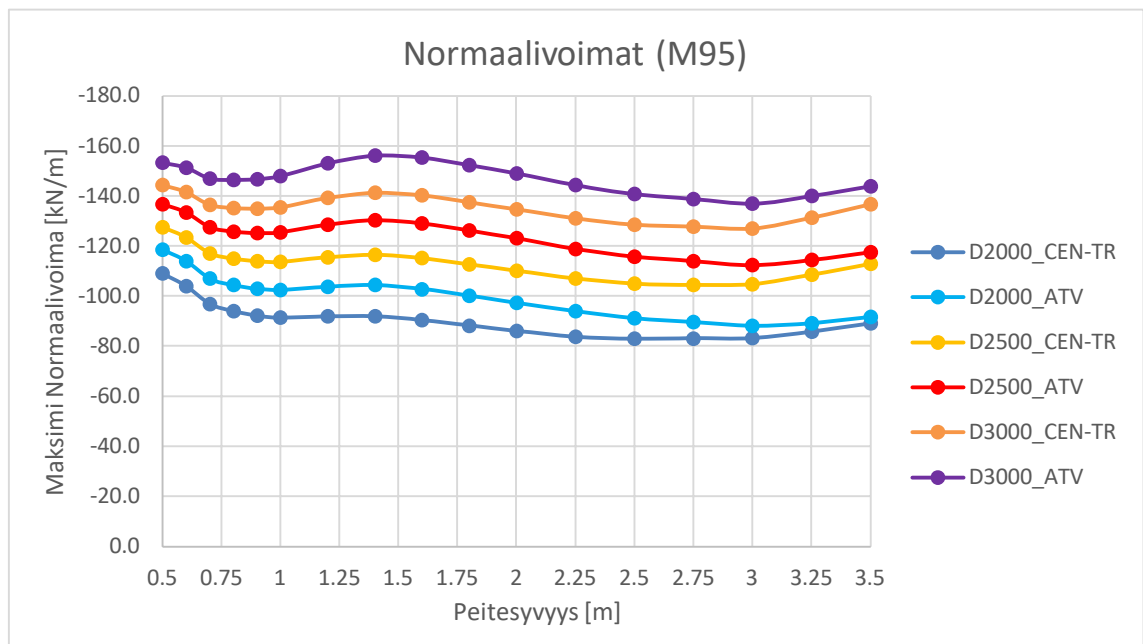
- Ympärystytön tiivistysluokka W ”well compacted material”
- Siiloteorian mukaisia redusointikertoimia hyödynnetään laskelmissa
- Päällysteen jäykkyyden ja kuormien jakamiskyvyn mahdollistavia redusointikertoimia ei käytetä liikennekuorman pystykuormille eikä vaakakuormille

Putkeen kohdistuvien taivutusmomenttien ja normaalivoimien vertailulaskennan toteutetaan vain lyhytaikaisessa tilanteessa. Pitkäaikaiset laskenta-arvot eivät ole vertailukelpoisia kappaleissa 3.8 ja 4.1 esitetyn mukaisesti. Seuraavissa kappaleissa käsiteltävissä rakenteen kestävyuden käyttöasteiden vertailussa ja taipumien vertailussa huomioidaan molemmat sekä lyhytaikainen, että pitkäaikainen mitoitus tilanne.

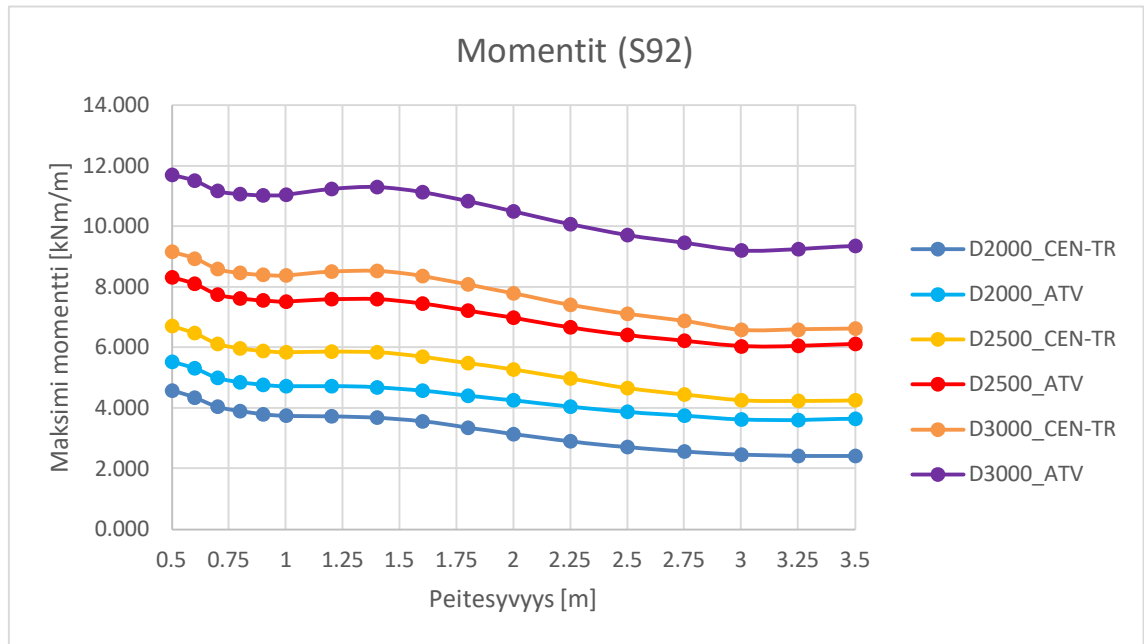
Kuvissa 35, 36, 37 ja 38 on esitettyä putkeen muodostuvat suurimmat taivutusmomenttirasitukset ja normaalivoimat eri peittosyvyyksillä, ympärystytön materiaaleilla ja valituilla mitoitusolettamuksilla putkikoittain.



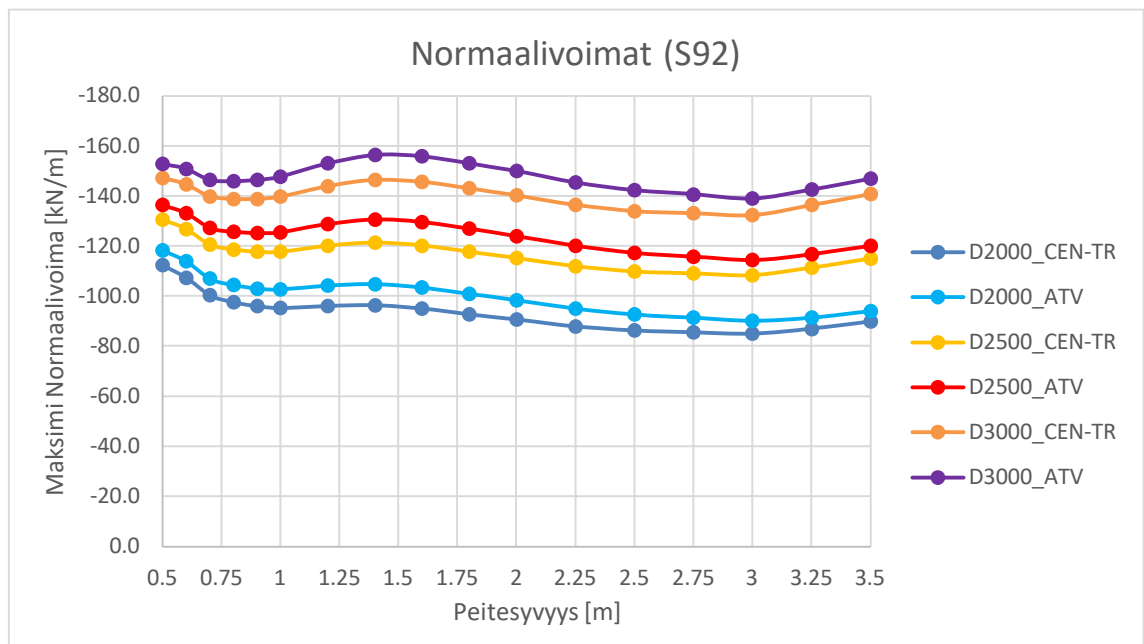
**Kuva 35.** Putkiin kohdistuvat mitoittavat taivutusmomentit. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäyttönä murske 95%.



**Kuva 36.** Putkiin kohdistuvat mitoittavat normaalivoimat. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäyttönä murske 95%.



**Kuva 37.** Putkiin kohdistuvat mitoittavat taivutusmomentit. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäyttönä sora 92%.



**Kuva 38.** Putkiin kohdistuvat mitoittavat normaalivoimat. Putkien koot D2000, D2500 ja D3000. Ympäristäyttönä sora 92%.

Havaintoja edellä esitetyistä putkien taivutusmomenttien ja normaalivoimien kuvaajista:

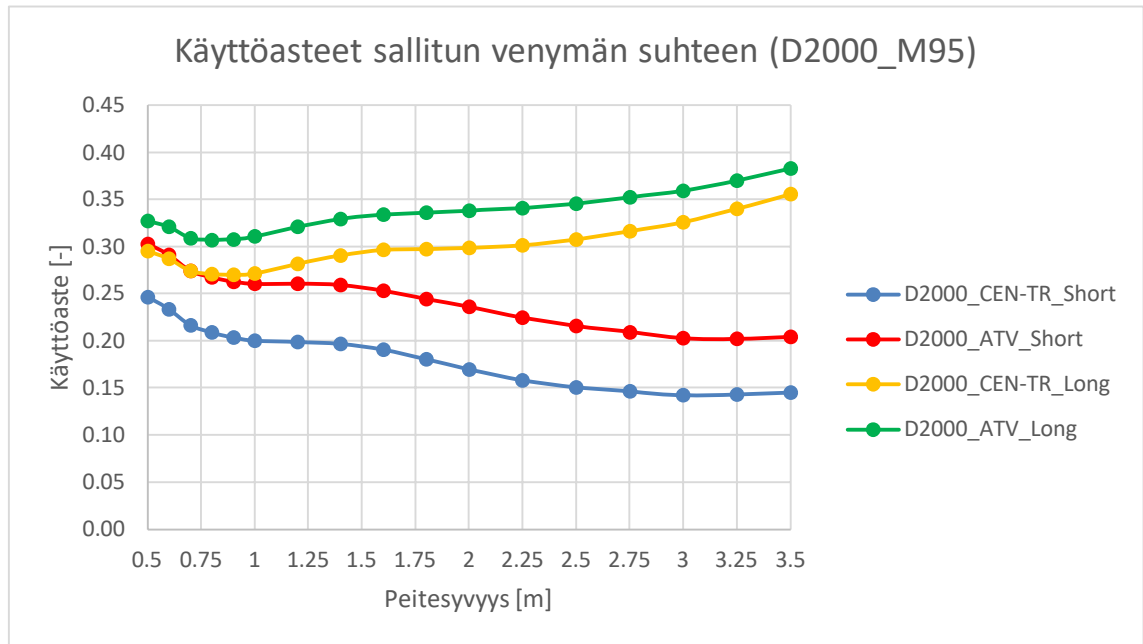
- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia eivätkä kuvaajat risteä toisiaan.
- ATV-127 mitoitusten mukaiset rasitukset sekä momenttien että normaalivoimien suhteen ovat kaikki suurempia kuin CEN/TR 1295-3 menetelmän vastaavat arvot.
- Mitoitusmenetelmien väliset erot momenttien suhteen ovat suuremmat kuin normaalivoimien. Momenttien välinen ero kasvaa putkikoon kasvaessa.
- Kuvaajien yhdenmuotisuus ja ATV-127 menetelmän mukaiset kauttaaltaan suuremmat rasitukset tukevat tavoitetta käyttää molempia mitoitusten menetelmiä rinnakkain tulevassa Väyläviraston suunnitteluohjeessa.

#### **4.9 Käyttöasteiden vertailu venymien suhteen**

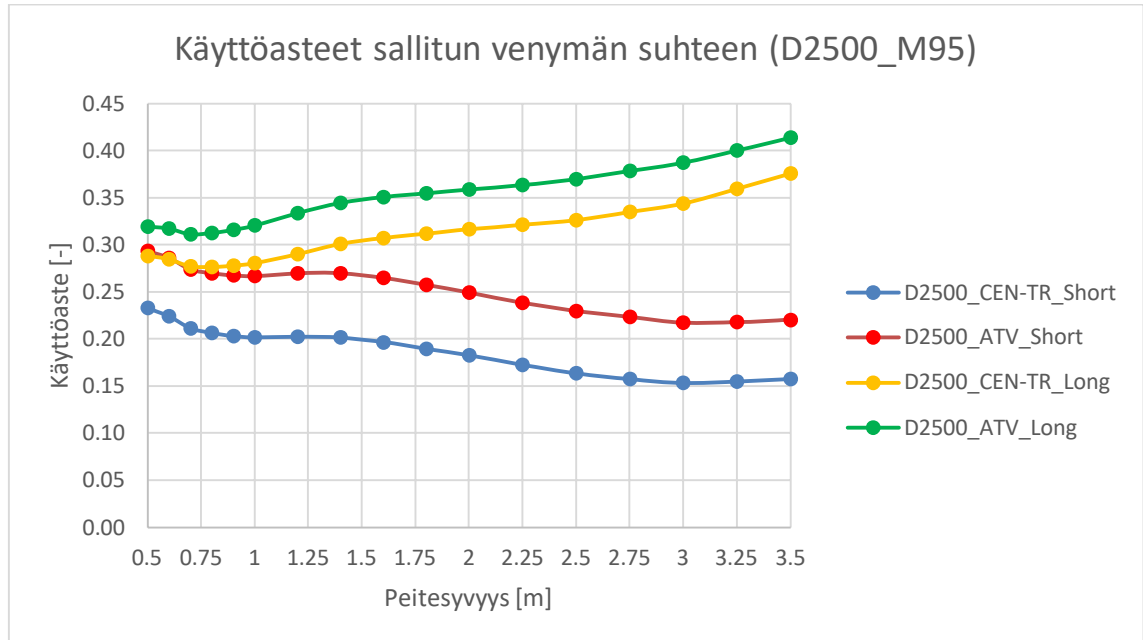
Edellisen kappaleen mukaisten momenttien ja normaalivoimien avulla voidaan laskea putken profiiliin muodostuvat suurimmat veto- ja puristusjännitykset ja niitä vastaavat venymät lyhytaikaisessa mitoitustilanteessa. Materiaalikohtainen venymälle sallittu raja-arvo jaetaan lasketuilla venymien arvoilla ja saadaan varmuusluku sallitun venymän suhteen. Varmuuslukujen tulee olla vähintään mitoitusten menetelmissä esitetyn materiaalikohdaisen raja-arvon suuruinen, jotta rakenteen laskennallinen kestävyys voidaan todeta hyväksytyksi. Vertailulaskennassa käytettyjen komposiittiputkien osalta varmuusluvun raja-arvo on venymien osalta 2,0. Kun raja-arvo jaetaan lasketulla varmuusluvulla, niin saadaan rakenteen käyttöaste venymän suhteen.

Pitkäaikaisessa tilanteessa CEN/TR 1295-3 ja AVT-127 mukaiset menetelmät poikkeavat toisistaan kappaleissa 3.8 ja 4.1 esitetyllä tavoilla. Lopputuloksena molemmista menetelmistä saadaan kuitenkin vastaava käyttöaste kuten lyhytaikaisessakin tilanteessa. Näin ollen pitkäaikaisen tilanteen mitoitustuloksille voidaan suorittaa vertailu, vaikka aiemmissa mitoitusvaiheissa saadut välitulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia.

Kuvissa 39, 40, 41, 42, 43 ja 44 on esitettyinä putkeen muodostuvat suurimmat käyttöasteet venymien suhteen eri peittosyvyyksillä, ympärystytön materiaaleilla ja valituilla mitoitustolettamuksilla putkikoittain sekä lyhyt- että pitkäaikaisilanteissa.

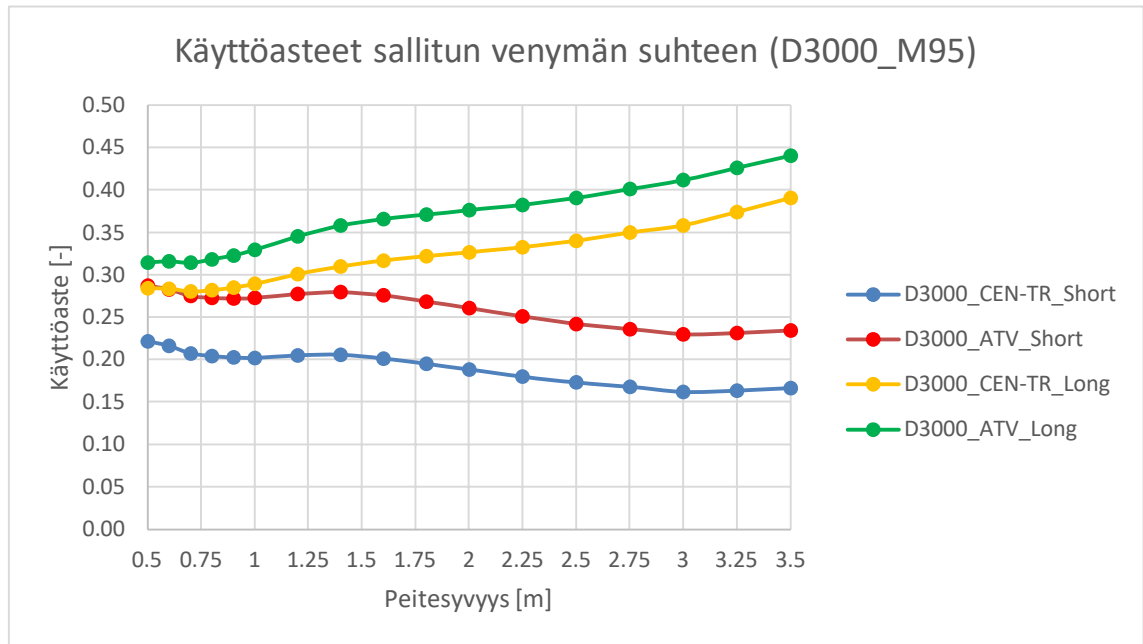


**Kuva 39.** Putken kestävyys käyttöasteet sallittujen venymien suhteen lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2000 ja ympäristäytönä murske 95%.

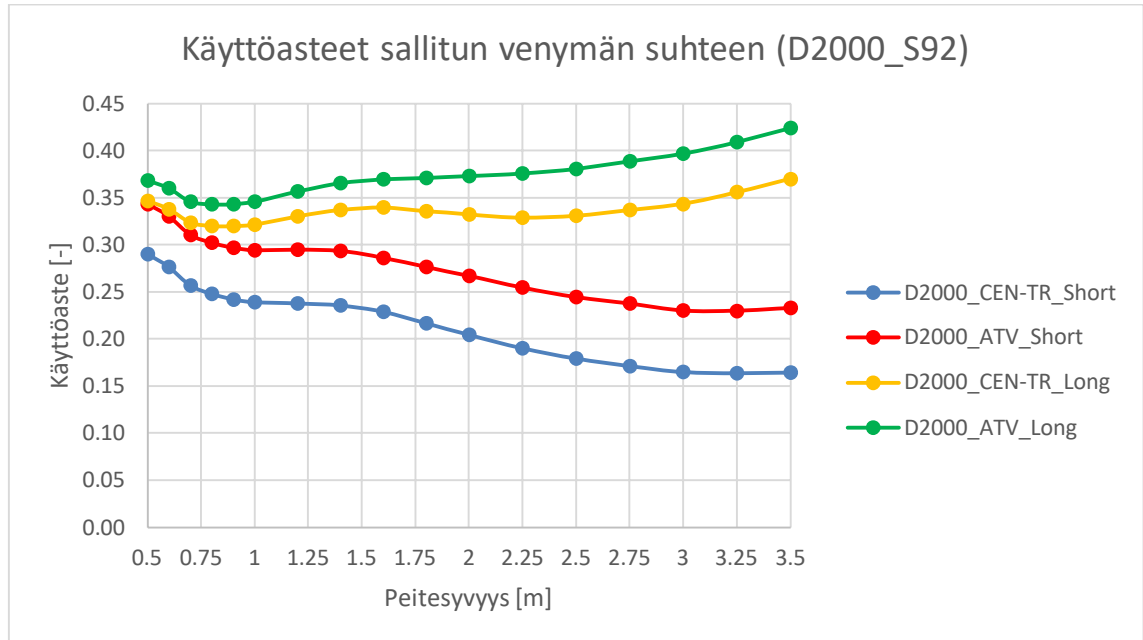


**Kuva 40.** Putken kestävyys käyttöasteet sallittujen venymien suhteen lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä murske 95%.

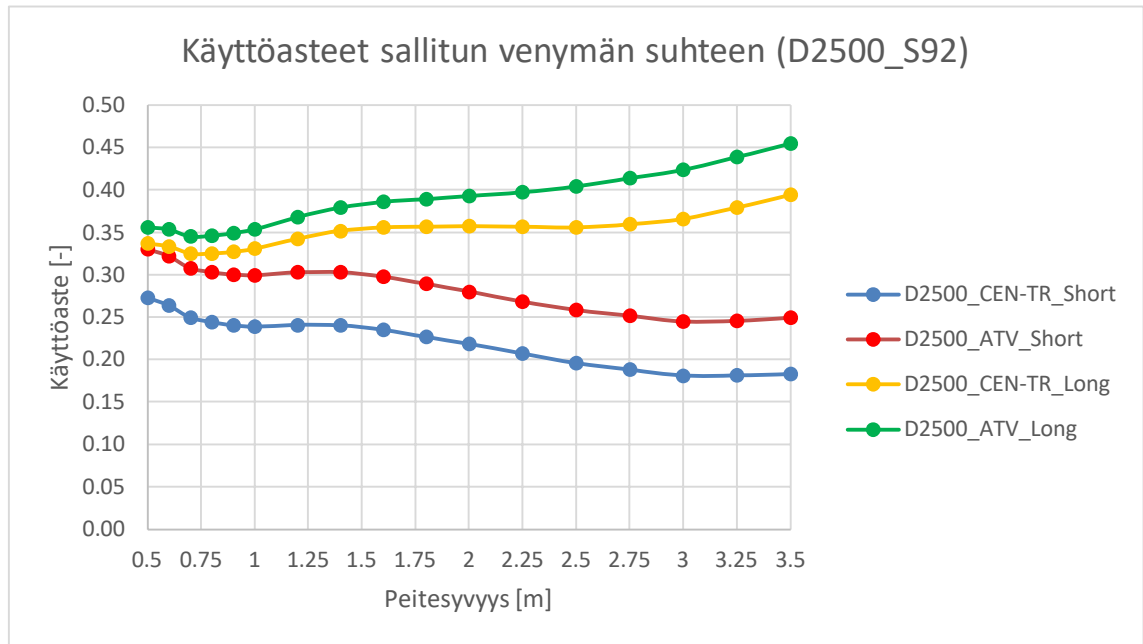




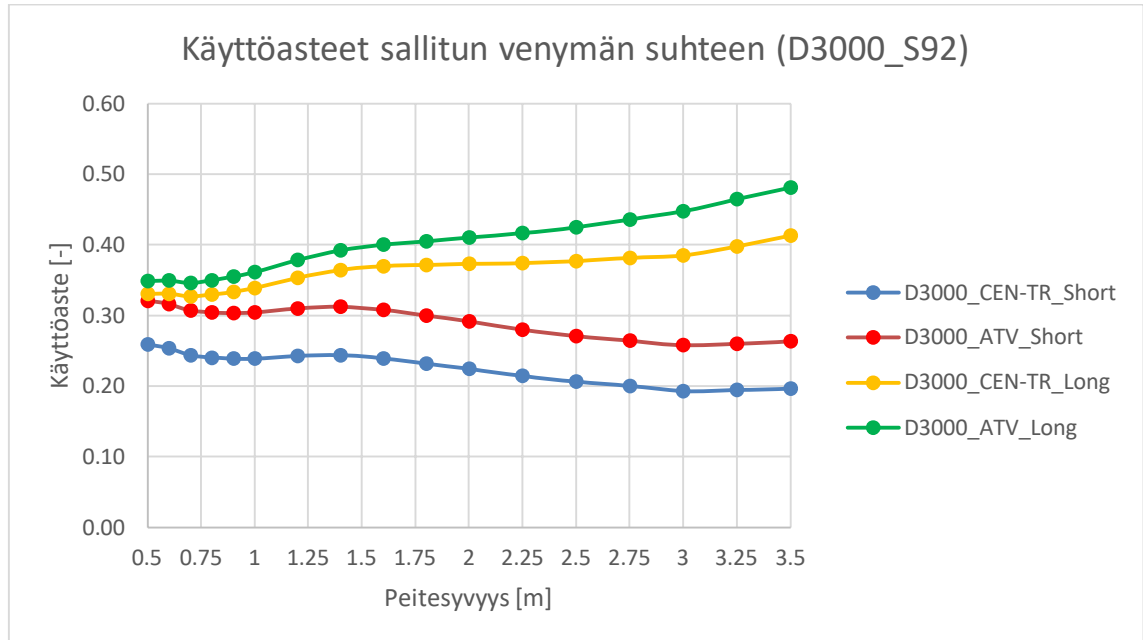
**Kuva 41.** Putken kestävyuden käyttöasteet sallittujen venymien suhteen lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D3000 ja ympäristäyttonä murske 95%.



**Kuva 42.** Putken kestävyuden käyttöasteet sallittujen venymien suhteen lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2000 ja ympäristäyttonä sora 92%.



**Kuva 43.** Putken kestävyys käyttöasteet sallittujen venymien suhteen lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä sora 92%.



**Kuva 44.** Putken kestävyys käyttöasteet sallittujen venymien suhteen lyhytaikaisessa ja pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D3000 ja ympäristäytönä sora 92%.

Havainnot edellä esitetyistä putkien venymien käyttöasteiden kuvaajista:

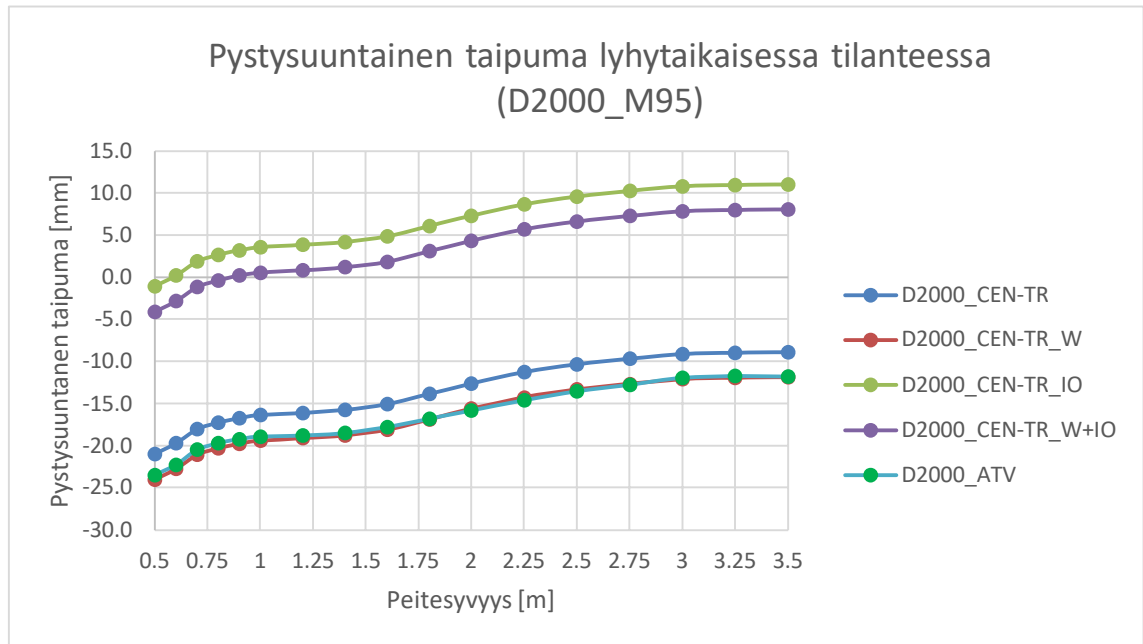
- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia eivätkä kuvaajat risteä toisiaan.
- Lyhytaikaisen tilanteen käyttöasteet pääasiassa pienentyvät peitesyvyyden kasvaessa. Liikennekuorman osuus kuormituksesta pienentyy nopeammin kuin peitesyvyydestä aiheutuva maatyön kuormitus kasvaa.
- Pitkäaikaisessa tilanteessa käyttöasteet kasvavat peitesyvyyden kasvaessa. Peitesyvyyden kasvaessa yhä suurempi suhteellinen osuus kuormituksesta muuttuu pitkäaikaiseksi kuormitukseksi (maatyö) lyhytaikaisiin kuormiin verrattuna (liikennekuormat), jolloin pitkäaikaisten laskentaparametrien (mm. putken ja maan jäykkyys-suhteet) ja putken pitkäaikaisen venymäkestävyyden (lyhytaikaista kestävyyttä heikompi) roolit kasvavat. Tämä näkyy käyttöasteiden kasvamisena.
- Kuvaajien yhdenmuotisuus ja ATV-127 menetelmän mukaiset kauttaaltaan suuremmat käyttöasteet tukevat tavoitetta käyttää molempia mitoitusmenetelmiä rinnakkain tulevassa Väyläviraston suunnitteluohjeessa.

#### 4.10 Pystysuuntaisten taipumien vertailu

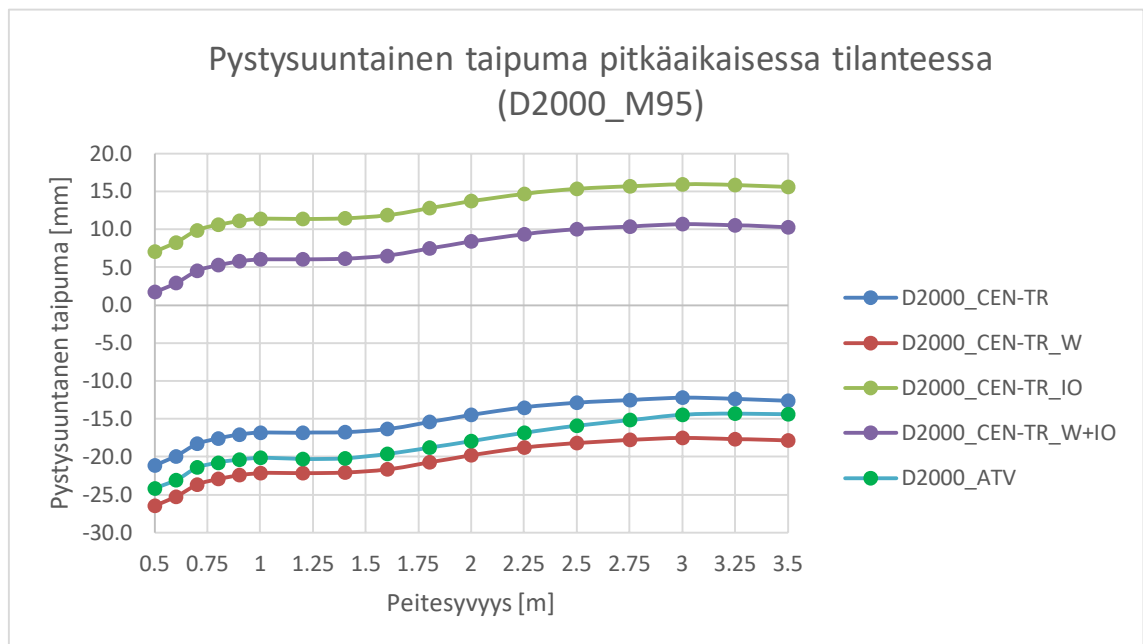
Putkiin muodostuvat pystysuuntaiset taipumat (putken poikkileikkauksen / renkaan muodonmuutokset) lasketaan molemmissa mitoitus-tavoissa CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 sekä lyhytaikaisessa, että pitkäaikaisessa tilanteessa kappaleessa 3.12 esitetyllä tavalla. [15, kappale A.11.2] [4, kappale 8.4]

Kuvissa 45-56 on esitettyinä putkeen muodostuvat pystysuuntaiset taipumat eri peitesyvyyksillä ja ympäristäytön materiaaleilla lyhyt- ja pitkäaikaisissa tilanteissa putkikoittain. Kuvaajien selitteissä on käytetty tunnisteita seuraavasti:

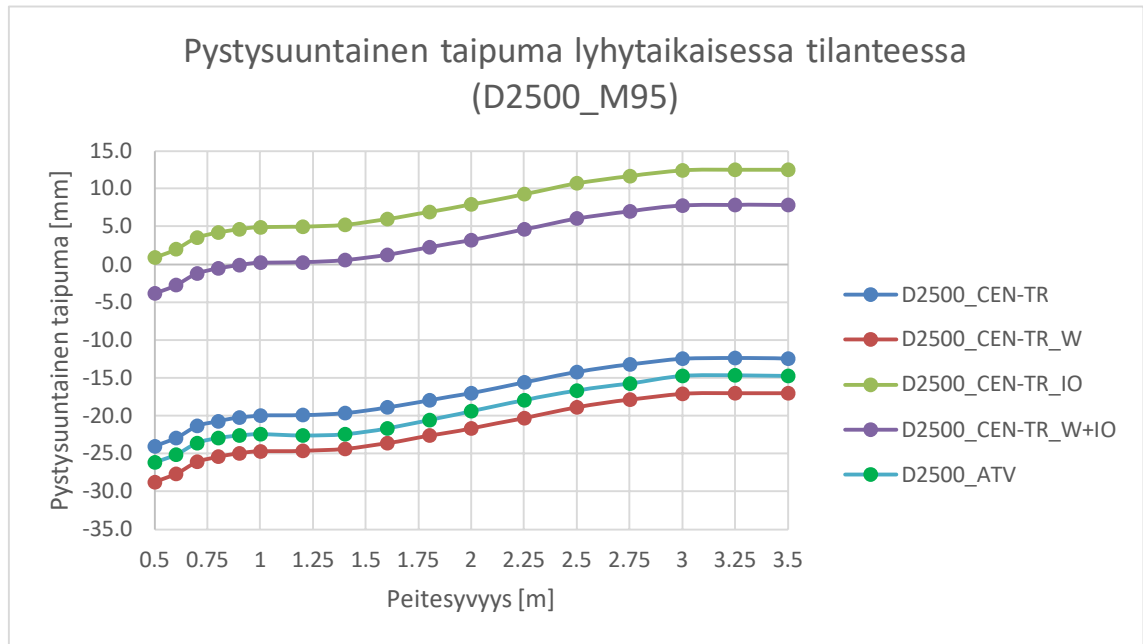
- ”tyhjä” = mitoitusmenetelmätunnisteen perässä ei ole lisämerkintöjä = ei huomioida putken sisällä olevan veden eikä alkumuodonmuutosten vaikutuksia
- ”W” = putken sisällä olevan veden vaikutukset ovat huomioituna taipumissa
- ”IO” = alkumuodonmuutosten vaikutukset ovat huomioituna taipumissa
- ”W+IO” = putken sisällä olevan veden ja alkumuodonmuutosten vaikutukset ovat huomioituna taipumissa



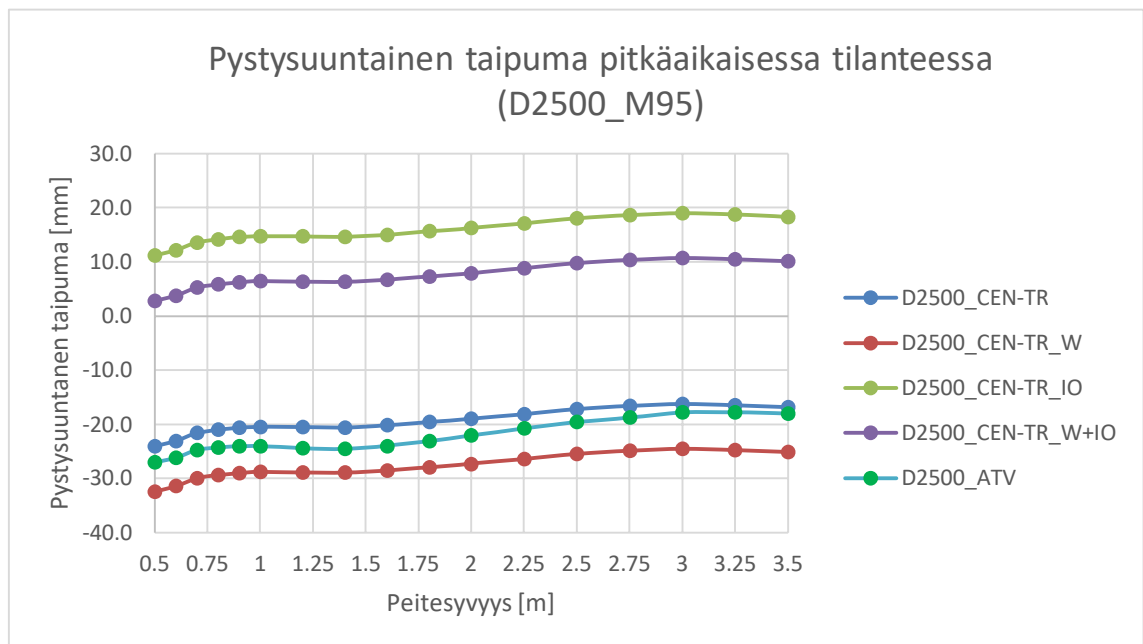
**Kuva 45.** Putkien pystysuuntaiset taipumat lyhytaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2000 ja ympäristäyttönä murske 95%.



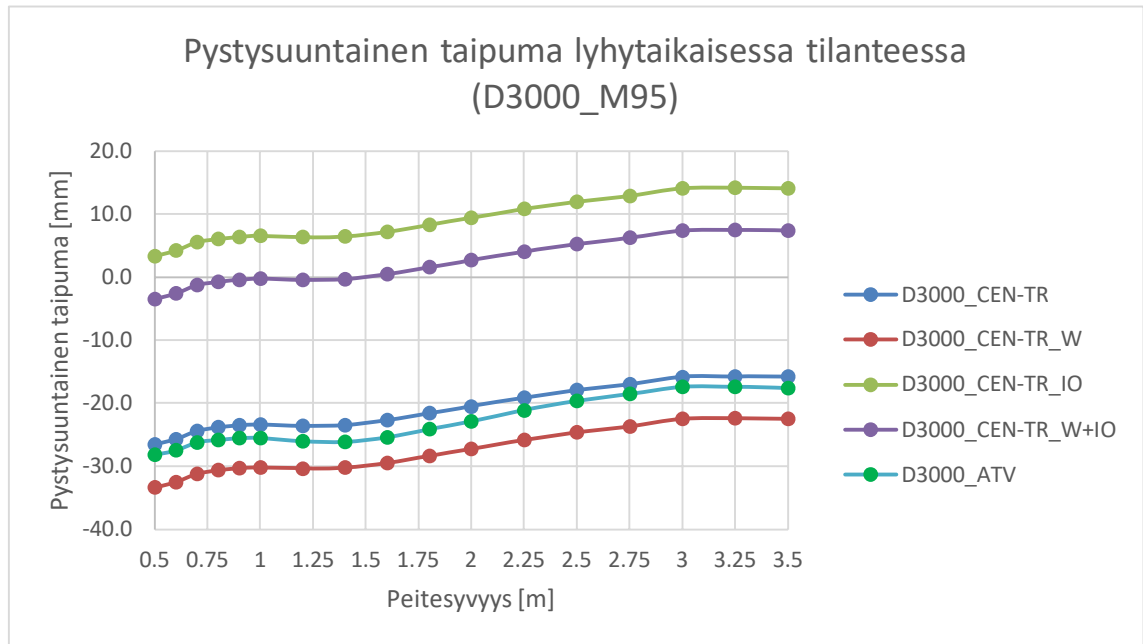
**Kuva 46.** Putkien pystysuuntaiset taipumat pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2000 ja ympäristäyttönä murske 95%.



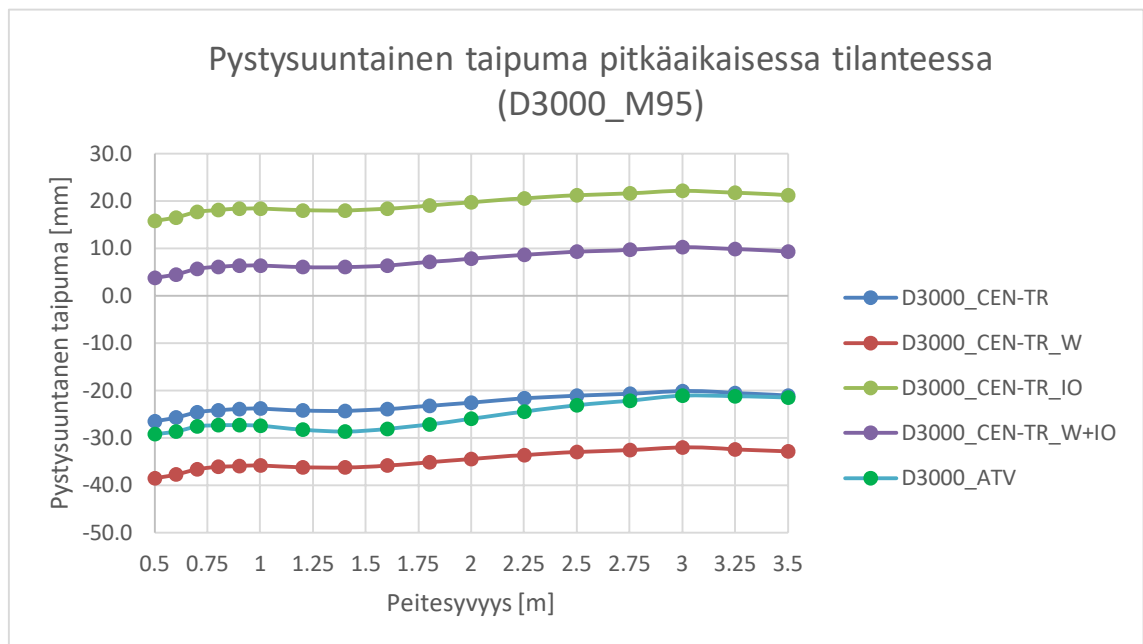
**Kuva 47.** Putkien pystysuuntaiset taipumat lyhytaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2500 ja ympäristäyttönä murske 95%.



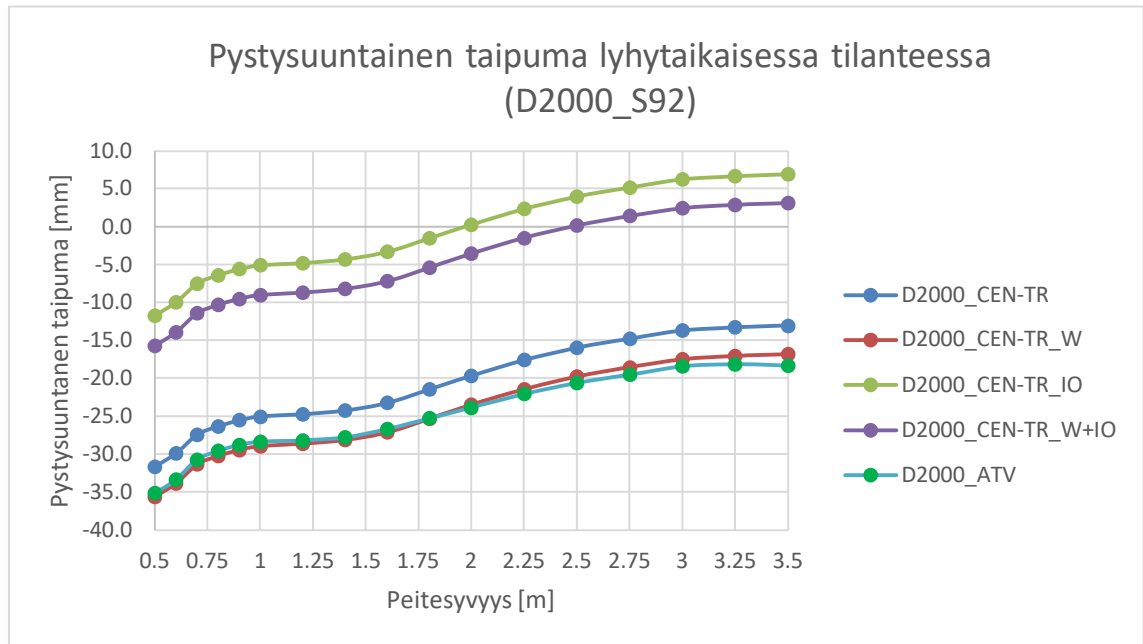
**Kuva 48.** Putkien pystysuuntaiset taipumat pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2500 ja ympäristäyttönä murske 95%.



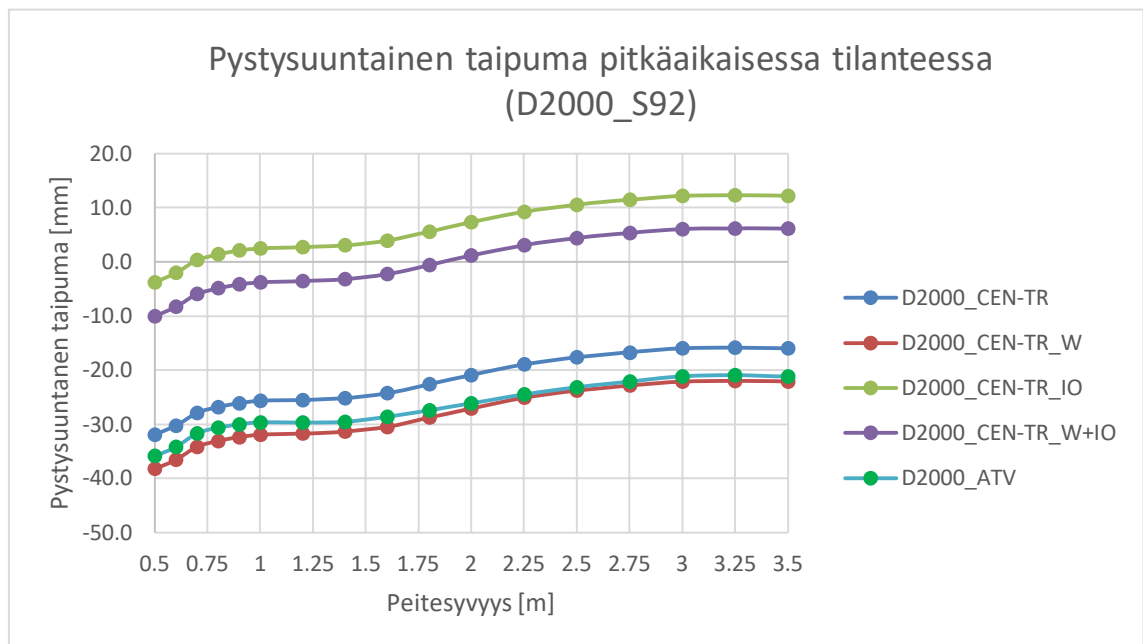
**Kuva 49.** Putkien pystysuuntaiset taipumat lyhytaikaisessa tilanteessa. Putken koko D3000 ja ympäristäyttönä murske 95%.



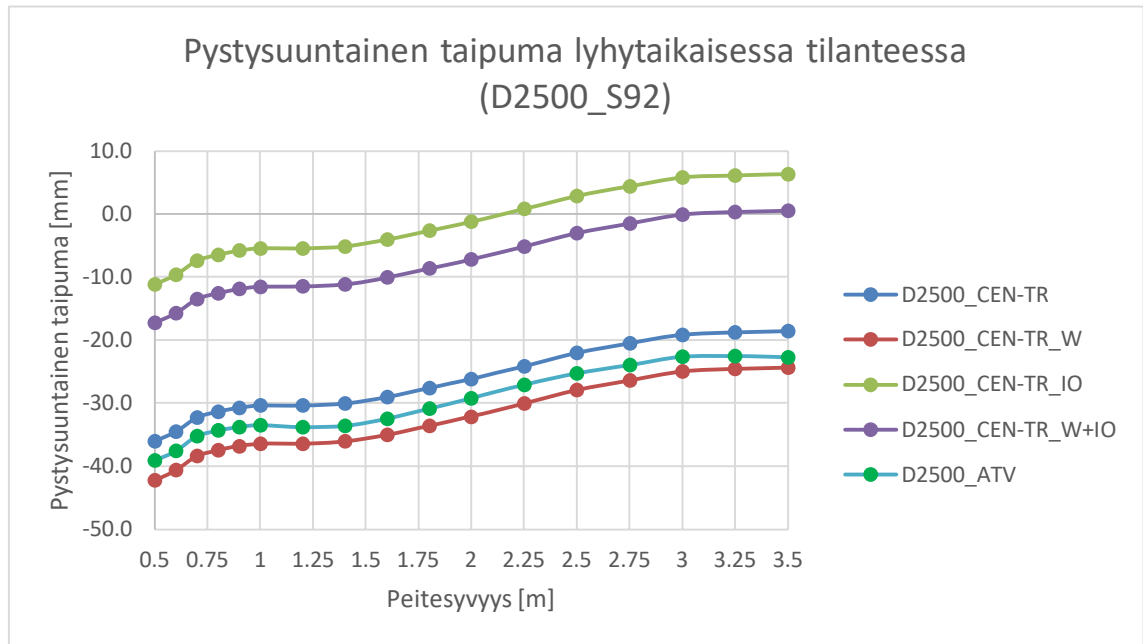
**Kuva 50.** Putkien pystysuuntaiset taipumat pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D3000 ja ympäristäyttönä murske 95%.



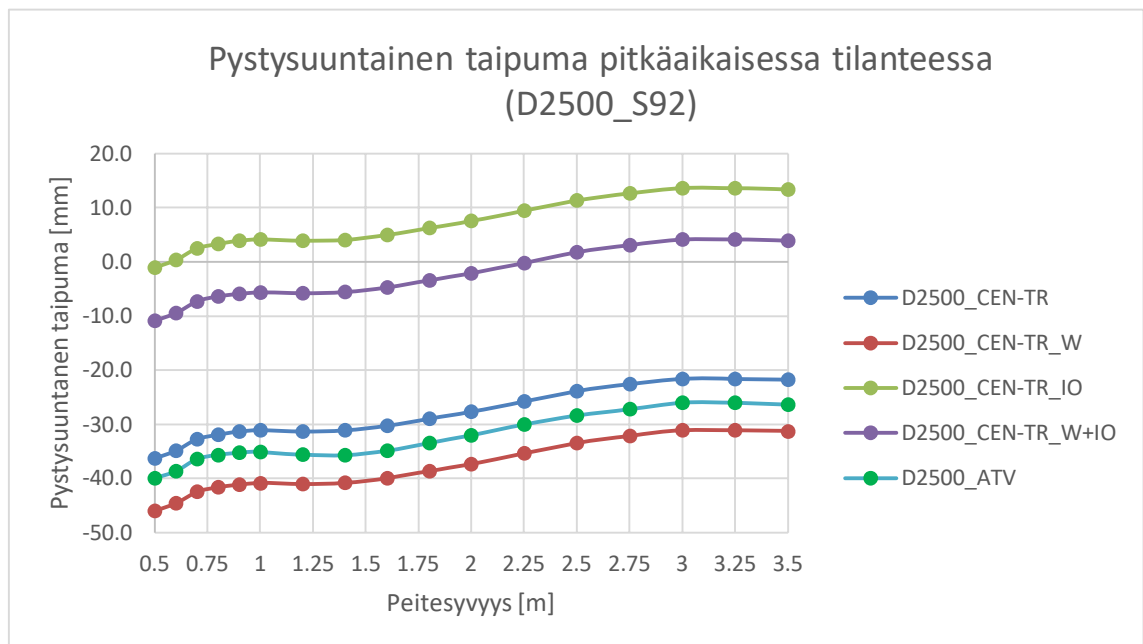
**Kuva 51.** Putkien pystysuuntaiset taipumat lyhytaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2000 ja ympäristäyttonä sora 92%.



**Kuva 52.** Putkien pystysuuntaiset taipumat pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2000 ja ympäristäyttonä sora 92%.

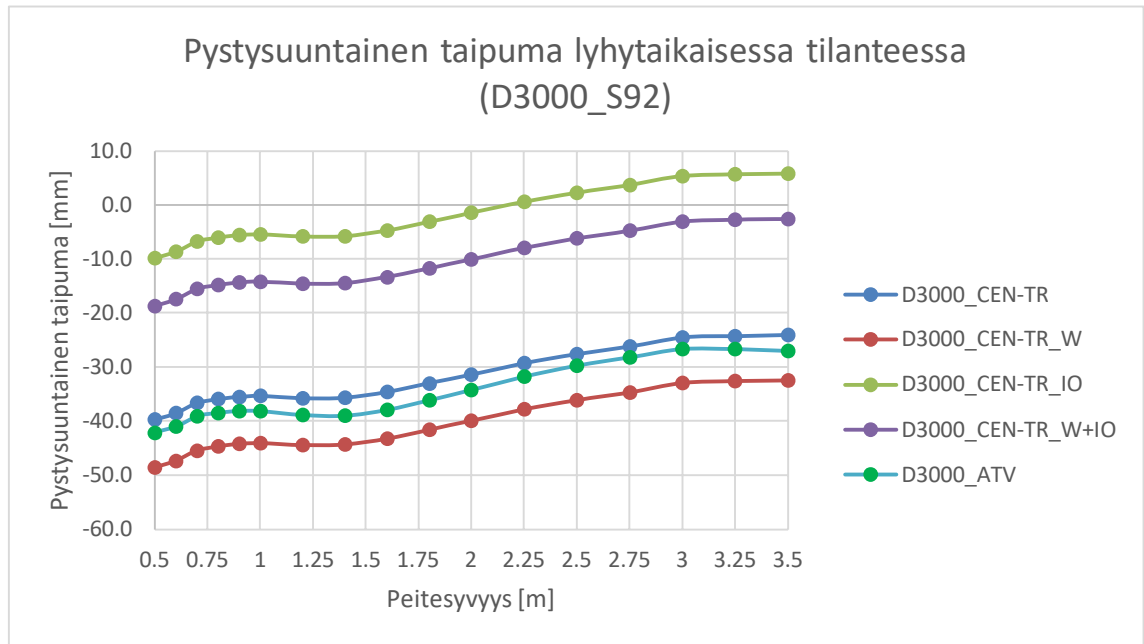


**Kuva 53.** Putkien pystysuuntaiset taipumat lyhytaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä sora 92%.

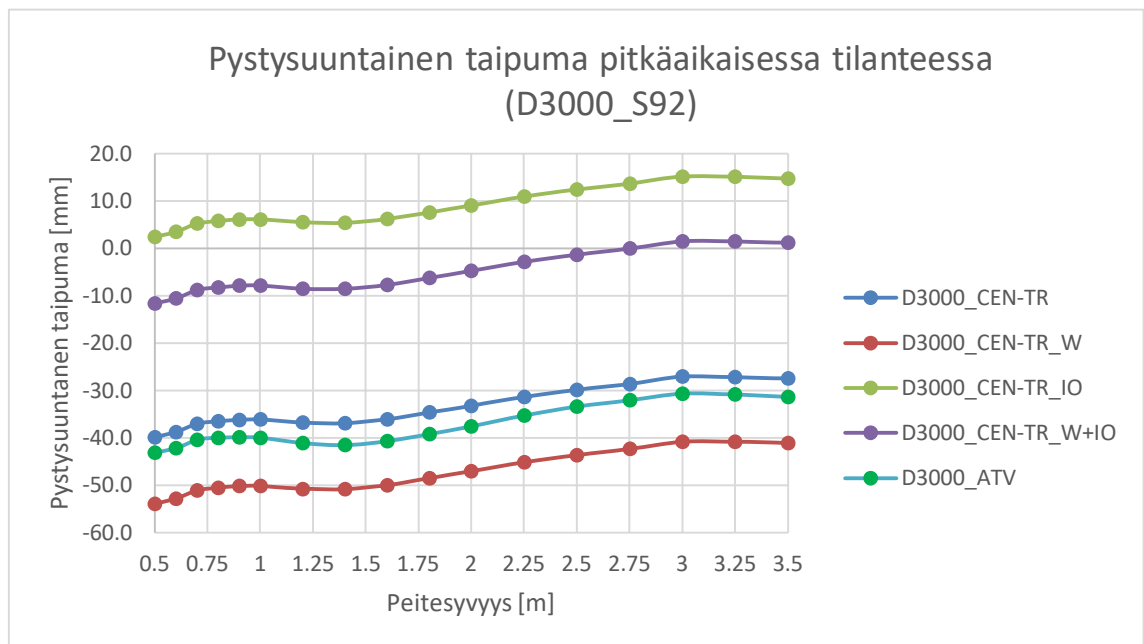


**Kuva 54.** Putkien pystysuuntaiset taipumat pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä sora 92%.





**Kuva 55.** Putkien pystysuuntaiset taipumat lyhytaikaisessa tilanteessa. Putken koko D3000 ja ympäristäytönä sora 92%.



**Kuva 56.** Putkien pystysuuntaiset taipumat pitkäaikaisessa tilanteessa. Putken koko D3000 ja ympäristäytönä sora 92%.

Havaintoja edellä esitetyistä putkien taipumien kuvaajista:

- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia.
- Alkumuodonmuutosten huomioiminen kasvattaa taipumia ylöspäin huomattavasti. Monin paikoin myös lopullinen taipuma jää tällöin positiiviseksi, jolloin putken poikkileikkaus on pystysuuntaisen ovaalin muotoinen. Alkumuodonmuutos kuvaa enemmänkin putken alkuasentoa ja asentoa johon putki muuntuu muiden kuormien vaikutuksen jälkeen. Alkumuodonmuutos ei siis toimi varsinaisena taipumana vaan lähinnä alkutilanteena muille tavanomaisemmille taipumille, jotka muodostuvat putkelle samansuuruisina alkutaipumasta riippumatta.
- Putken sisällä olevan veden vaikutus kasvattaa taipumaa alaspäin. Veden vaikutus kasvattaa taipumaa itsenäisesti riippumatta onko alkumuodonmuutokset huomioituna vai ei.
- ATV-127 mukaiset laskennalliset taipumat muodostuvat aina CEN/TR 1295-3 mukaisia taipumia suuremmiksi, kun putken sisällä olevan veden vaikutusta ei huomioida CEN/TR 1295-3 taipumissa. ATV-127 mukainen laskenta ei sisällä veden vaikutuksia. Veden vaikutukset huomioidessa CEN/TR 1295-3 mukainen taipuma ylittää ATV-127 menetelmän mukaisen taipuman.
- Kuvaajien yhdenmuotisuus ja ATV-127 menetelmän mukaiset kauttaaltaan suuremmat taipumat (ilman veden ja alkumuodonmuutosten vaikutuksia) tukevat tavoitetta käyttää molempia mitoitusmenetelmiä rinnakkain tulevassa Väyläviraston suunnitteluohjeessa.

## 5. MITOITUSPERIAATTEET SUUNNITTELUOHJETTA VARTEN

### 5.1 Yleistä

Kappaleen 4 mukaisten vertailulaskelmien tuloksena voidaan todeta, että CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mukaiset mitoitusmenetelmät voidaan saattaa tulosten osalta yhdenmukaisiksi valitsemalla alla listatut mitoitusoletukset CEN/TR 1295-3 mukaisessa mitoituksessa:

- Ympäristäytöjen tiiveysluokaksi valitaan W "well compacted material".
- Päällysteen jäykkyyden ja kuormien jakokyvyn mukaisia redusointikertoimia ei käytetä liikennekuormille.
- Taipumien laskennassa ei huomioida putken sisällä olevan mahdollisen veden vaikutuksia.
- Taipumien laskennassa ei huomioida putkeen muodostuvia alkumuodonmuutoksia (initial ovalization).

Lisäksi mitoituksessa tulee käyttää yhteneviä käytäntöjä alla listattujen mitoitusvalintojen kohdalla:

- Ympäristäytön luokitukset tulee valita vastaamaan toisiaan. Esimerkiksi CEN/TR 1295-3 menetelmässä luokitukset ET1a (Embedment type) ja I1 (Installation condition) ja vastaavasti ATV-127 mukaisessa laskennassa luokat A1 (Covering condition) ja B1 (Embedding condition).
- Ympäristäytöjen laskentaparametrien tulee vastata toisiaan.
- Siiloteorian käyttö on mahdollista ohjeiden sallimissa rajoissa. Siiloteorian vaikutus jää siltakokoluokan putkilla ja tavanomaisilla peitesyvyyksillä vähäiseksi
- Liikennekuormituksina tulee käyttää samoilla periaatteilla ja kuormakaavioilla laskettuja Boussinesqin teorian mukaisia kuormituksia.

Edellä mainittuja valintoja käytettäessä CEN/TR 1295-3 menetelmän tulokset jäävät ATV-127 mukaisia tuloksia pienemmiksi rakenteeseen muodostuvien taivutusmomenttien, jännitysten ja venymien ja taipumien suhteen. Ero ei kuitenkaan ole merkittävän suuri. Esimerkiksi rakenteen kestävyuden (venymätarkastelut) osalta käyttöasteiden välinen ero on suuruusluokaltaan noin 5 prosenttiyksikköä vertailulaskelmien mukaisille rakenteille.

Tulokset tukevat hyvin tavoitetta käyttää CEN/TR 1295-3 mukaista mitoitusmenetelmää tulevassa Väyläviraston muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeessa pääasiallisena mitoitusmenetelmänä ja ATV-127 mukainen menetelmä voidaan hyväksyä vaihtoehtoisena menetelmänä, jolla saadaan laskennaltaan monimutkaisempaan CEN/TR 1295-3 menetelmään nähden varmalla puolella olevat laskentatulokset.

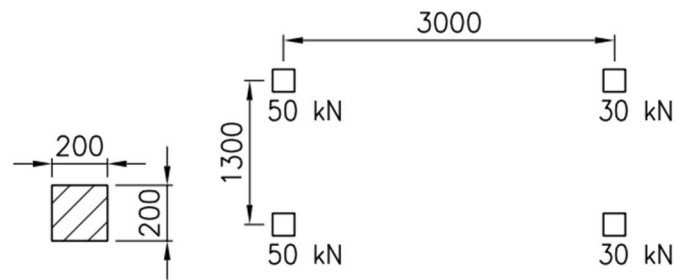
## 5.2 Liikennekuormat

Liikennekuormien aiheuttamat kuormitukset putken laella lasketaan kappaleen 3.3 mukaisesti Boussinesqin teoriolla. Väyläviraston tulevaa muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjetta varten tulee laatia valmiiksi laskettu liikennekuormien aiheuttamien kuormien kuvaaja peitesyvyyksien mukaan. Valmiiksi lasketulla kuvaajalla nopeutetaan suunnittelijoiden työtä ja vähennetään virheen mahdollisuutta liikennekuormien suuruuksien määrittämisessä. Tässä kappaleessa muodostetaan kuvaajat peitesyvyyksille 0,5...10m ja kuormituksina käytetään kuormakaavioita LM1, LM2, kevyenliikenteen huoltoajoneuvo, LM71-35 (1 raide) ja LM71-35 (2 raidetta).

Vertailulaskelmien yhteydessä kappaleessa 4.3 esitettiin LM1 ja LM2 kuormakaavioiden aiheuttamat jännitykset putken laella peittosyvyyksillä 0,5...3,5m. Laajennetaan tulokset tässä kappaleessa 10m peitesyvyyteen saakka.

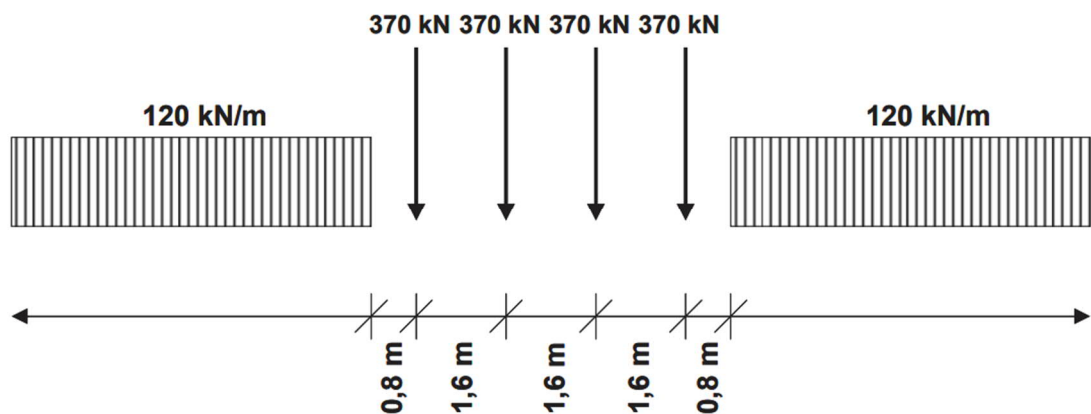
Kevyenliikenteen siltojen huoltoajoneuvon kuormakaavio huomioidaan Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” mukaisesti. Kevyenliikenteen siltojen huoltoajoneuvon kuormakaavio muodostuu kahdesta kahta rengaskuormaa kuvaavasta telistä. Teliä painot ovat 100kN ja 60kN. Huoltoajoneuvon kuormakaavio ei sisällä tasaisesti jakautunutta pintakuormaa. Kevyenliikenteen tasainen kuormitus ja huoltoajoneuvon kuormakaavio eivät vaikuta samanaikaisesti. [9]

Kuvassa 57 on esitettyä huoltoajoneuvon kuormakaavioin rakenne ja pyöräkuormien väliset etäisyydet. Pyöräkuormille käytetään alla olevan kuvan mukaisia kosketuspintojen mittoja kuormien paikallisten vaikutusten selvittämisessä.



**Kuva 57.** Kevyenliikenteen huoltoajoneuvon kuormakaavion rakenne, mitat ja pyöräkuormien kosketuspinnat.

Rataliikennekuormat huomioidaan Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” mukaisesti. Kuormakaaviona käytetään LM71-35. Kuormakaavio koostuu nauhakuormasta ja pistemäisistä kuormista kuvan 58 mukaisesti. [9]



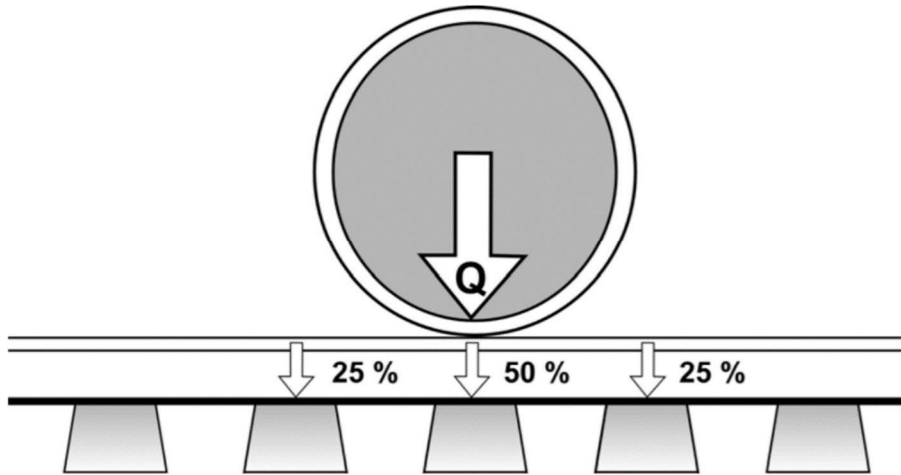
**Kuva 58.** Kuormakaavio LM71-35 rakenne, mitat ja kuormien suuruudet. [9]

Rataliikenteen putkelle aiheuttamien kuormien laskemiseksi Boussinesqin teoriolla kuormakaavion kuormat jaetaan ratapölkkyille. Kuormien oletetaan jakautuvan tasan ratapölkyn pohjapinta-alalle. Ratapölkyn pinta-ala mukaisien tasaisten kuormien avulla voidaan laskea Boussinesqin teorian mukainen ratakuorman aiheuttaman jännitys putken laella. Laskennassa peitesyvyytenä käytetään mittaa ratapölkyn alapinnasta putken laelle. Oletetaan ratapölkyn sivumitoiksi 2,6m ja 0,2m. Ratapölkkyjen pölkkyvälinä käytetään arvoa 0,6m.

Nauhakuorman aiheuttama rasisus yhtä pölkkyä kohden lasketaan kaavalla 6.

$$p = \frac{120 \text{ kN/m}}{k_{\text{pölkkyväli}}} = \frac{120 \text{ kN/m}}{0,6 \text{ m}} = 72 \text{ kN} \quad (6)$$

Kuormakaavion pistekuormien jakautumisen ratapölkkyille oletetaan noudattavan Väyläviraston ohjeen "RATO 3 Radan rakenne (LO 13/2018)" kohdan 3.8.5 mukaista periaatetta. Periaate esitettynä kuvassa 59. [14]



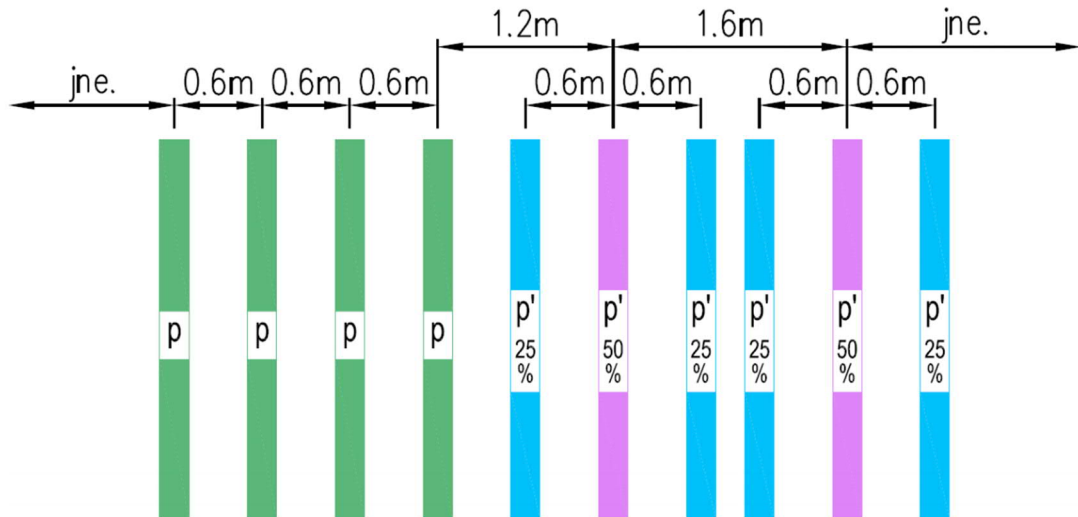
**Kuva 59.** Rataliikenteen kuormakaavio pistekuormien jakautuminen ratapölkkyjen kesken. [14]

Kuvan 59 mukaisesti ratapölkkyjen kuormitukseksi kuormakaavion pistekuormista saadaan siis:

$$p'(50\%) = 380kN \cdot 50\% = 190kN \quad (7)$$

$$p'(25\%) = 380kN \cdot 25\% = 95kN \quad (8)$$

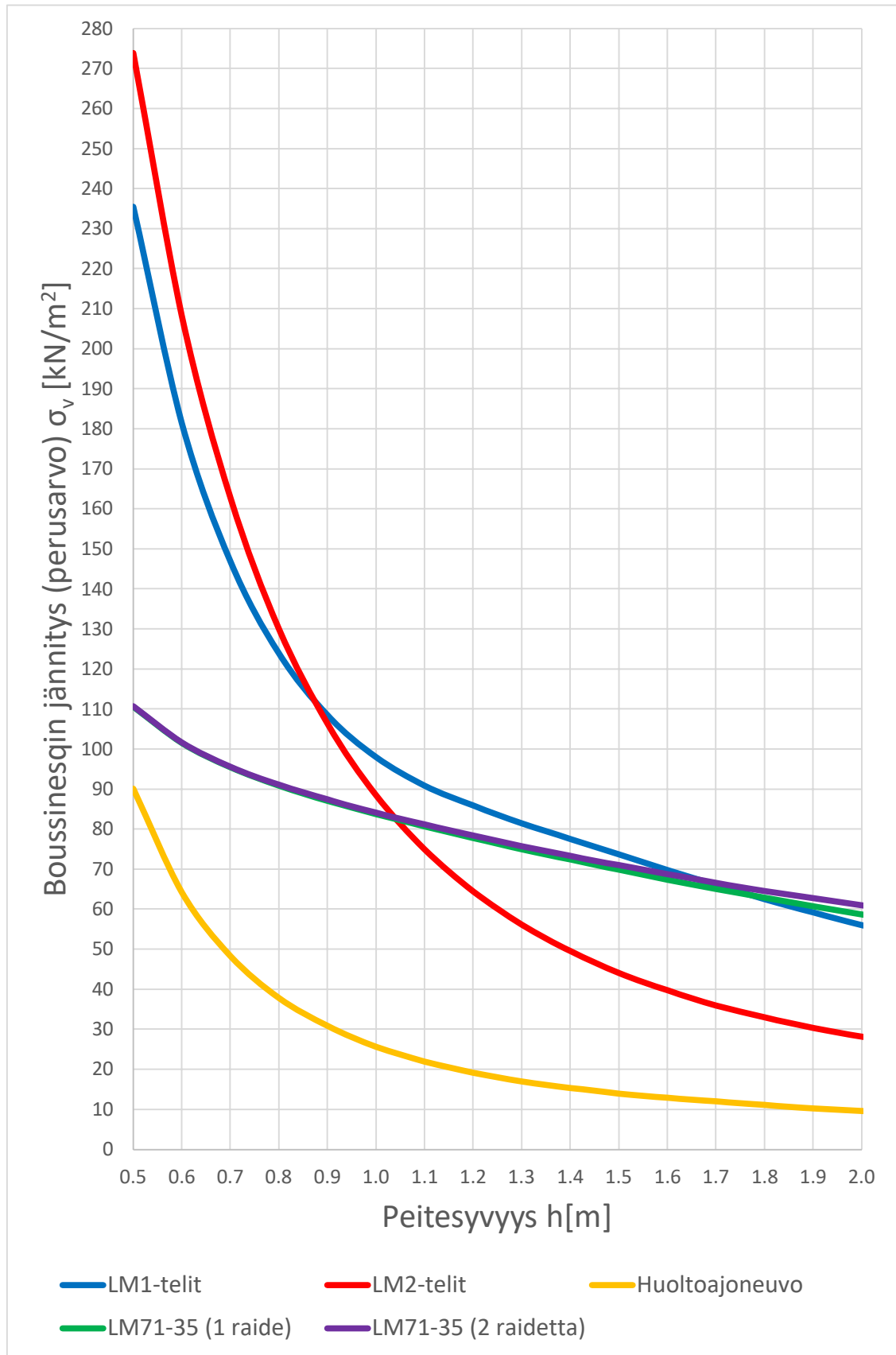
Pistekuormat ovat kuormakaaviossa 1,6 m välein. Välimatka ei ole tasan jaollinen 0,6 m pölkkyvälille. Boussinesqin teorian mukaista laskentaa varten yksittäisten pistekuormien kuormittamat kolmen ratapölkyn kokonaisuudet asetetaan pistekuormien välisen 1,6 m etäisyyden päähän toisistaan. Tällöin 0,6m pölkkyväli toteudu kaikissa kohdassa, mutta kuormakaavion mukaisten kuormien sijainnit ovat oikein. Kuvassa 60 on esitettyä Boussinesqin teoriolla laskettava rataliikenteen kuormakaavio pölkkykuormiksi muunnettuna.



**Kuva 60.** Rataliikenteen kuormakaavio pölkkykuormiksi muunnettuna Boussinesqin teorian mukaisten jännitysten laskentaa varten.

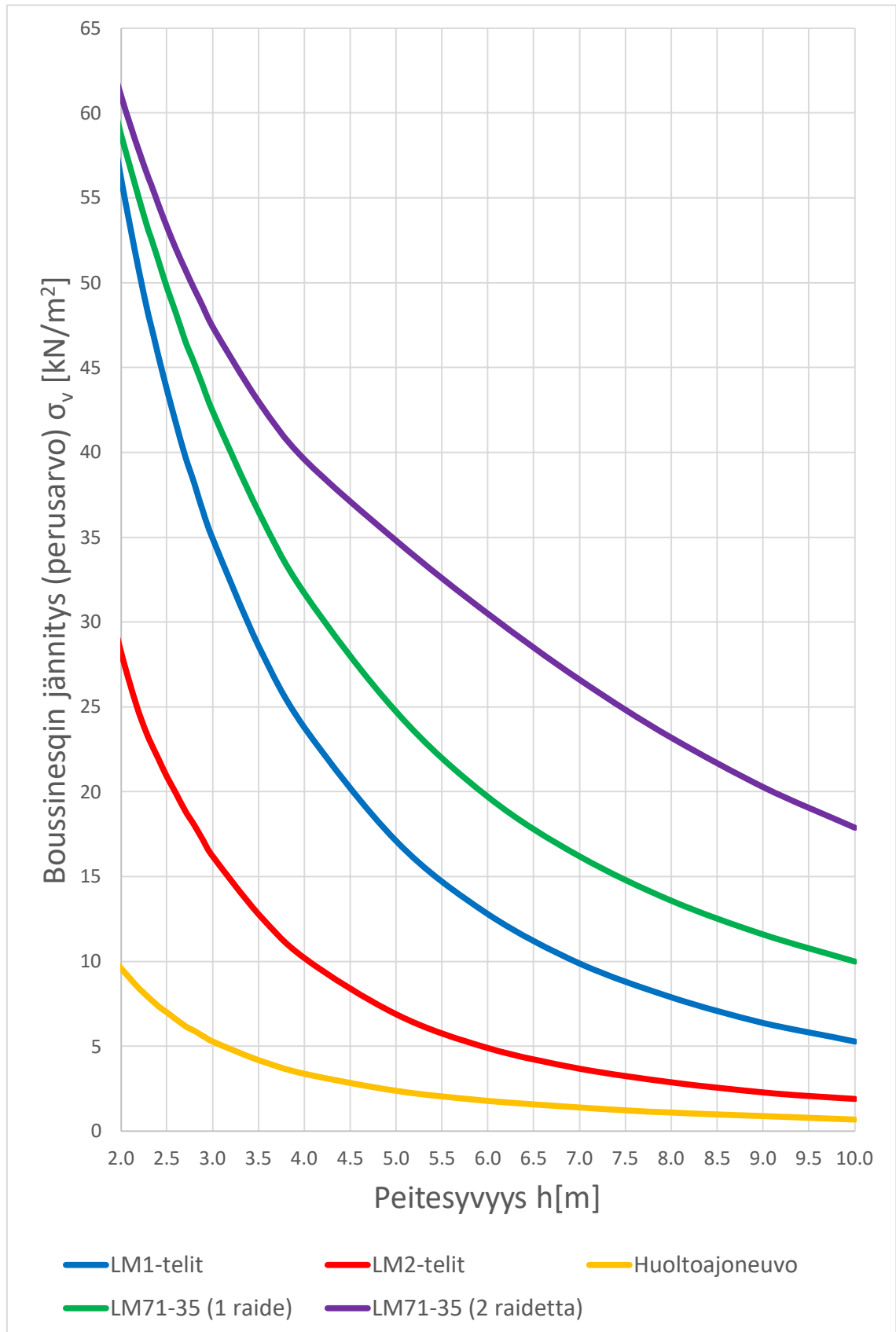
Kuvissa 61 ja 62 on laskettuna Boussinesqin teorian mukaiset jännitykset putken laella kuormakaavioiden LM1 (vain telikuormat), LM2, kevyenliikenteen huoltoajoneuvo, LM71-35 (1 raide) ja LM71-35 (2 raidetta). 2-raiteisessa LM71-35 kuvaajassa vierekkäisten raiteiden keskiövälinä on käytetty arvoa 4,5 m. Kuvaajat on toteutettu kahdessa osassa peitesyvyyden suhteen niiden tulkitsemisen helpottamiseksi. Kuvaajien arvot sisältävät vain kuormituksen perusarvon. Kuvaajien arvoihin tulee kohdistaa kaikki mitoitusmenetelmien mukaiset lisäkertoimet ja lisätä kuormakaavioihin mahdollisesti sisältyvät tasaisesti jakautuneet pintakuromat lopullisten mitoituskuormien aikaansaamiseksi.

Jännitysten laskennassa huomioon otettava arvoista on, että maksimijännityksen sijainti XY-tasossa vaihtuu tarkastelusyvyuden Z muuttuessa. Pienillä syvyyksillä maksimijännitys sijaitsee lähempänä yksittäisen pyöräkuorman kuorma-alueen keskipistettä. Tarkastelusyvyuden kasvaessa maksimijännityksen sijainti siirtyy kuormakaavioiden pyöräkuormien välille, jossa se altistuu useamman pyöräkuorman aiheuttamille jännityksille.



**Kuva 61.** Liikennekuormakaavioiden aiheuttamat jännitykset putken laella peitesyvyysvälillä 0,5...2,0m.





**Kuva 62.** Liikennekuormakaavioiden aiheuttamat jännitykset putken laella peitesyvyysvälillä 2,0...10,0m.

### 5.3 Staattinen mitoitus

Mitoituksessa käytetään kappaleessa 4.4 esitettyjä ympärystäytön maaparametrejä ja kappaleessa 5.2 esitettyjä Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” mukaisten kuormakaavioiden aiheuttamia liikennekuormien jännityksiä.

Staattisessa mitoituksessa tulee tarkistaa putkien osalta seuraavat asiat:

- Putken materiaalin kestävyys taivutusmomentin ja normaalivoiman yhdistelmää vastaan (muoviputkilla vertaamalla jännityksiä ja komposiittiputkilla vertaamalla venymiä). Kestävyystarkastelut suoritetaan lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitustilanteissa. Putkesta tulee tarkistaa kestävyys erikseen putken laella (crown/top), putken sivuilla (haunch/springline) ja putken alaosassa (invert/bottom).
- Putken pystysuuntaisen taipuman/muodonmuutoksen suuruus verrattuna sallittuihin raja-arvoihin. Taipumatarkastelut suoritetaan lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitustilanteissa. Kuormituksena käytetään ympärystäytön maanpainoa ja liikennekuormia.
- Putken kestävyys stabiliteetin menettämistä vastaan. Putken seinämän nurjahduskestävyys ympärystäytön maanpainolle, liikennekuormille ja nostevoiman vaikutuksille ja niiden yhdistelmille. Stabiilitietarkastelut suoritetaan lyhyt- ja pitkäaikaisissa mitoitustilanteissa.

Kuormina käytetään ominaiskuormia ilman murtotilan kertoimia. Tuloksia verrataan kestävyksien ominaisarvoin. Kelpoisuus todetaan vertaamalla ominaisarvoilla määritettyjen rasiusten ja kestävyksien suhdetta vaadittuun kokonaisvarmuuslukuun. CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmillä laskettaessa käytetään samoja kokonaisvarmuuslukuja.

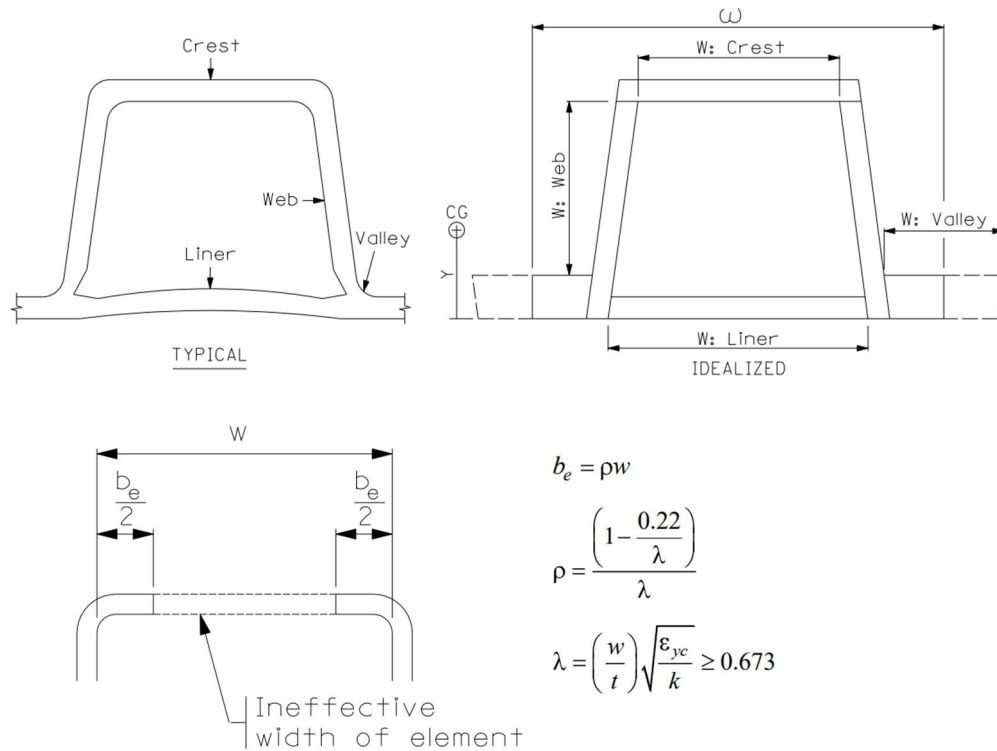
Putken staattisessa mitoituksessa käytetään kokonaisvarmuuskertoimina seuraavia arvoja:

- Muoviputket (esim. HDPE)  $F_{S,R} = 2,5$
- Komposiittiputket (esim. GRP)  $F_{S,R} = 2,0$

Putken stabiilitietin mitoituksessa (nurjahdus) käytetään kokonaisvarmuuskertoimina seuraavia arvoja:

- Muoviputket (esim. HDPE)  $F_{S,I} = 2,0$
- Komposiittiputket (esim. GRP)  $F_{S,I} = 2,0$

Kotelopoikkileikkauksisten putkien poikkileikkaussuureissa tulee huomioida koteloiden seinämien paikallinen nurjahdus/lommahdus. Tämän huomioimiseen ei anneta ohjeita CEN-TR 1295-3 tai ATV-127 menetelmissä. Paikallinen seinämien nurjahdus/lommahdus voidaan huomioida käyttämällä poikkileikkaussuureiden laskennassa seinämille tehollisia mittoja. Teholliset mitat voidaan laskea "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications" [1] kohdan 12.12.3.10.1b mukaisesti. Kuvassa 63 on esitettyä seinämien tehollisten mittojen määrittäminen.



**Kuva 63.** Profiilin seinämien tehollisten mittojen määrittelmät. [1]

Kuvassa esitetyjen symbolien selitteet:

$b_e$  = seinämän tehollinen mitta nurkka-alueiden välillä

$w$  = seinämän kokonaismitta nurkka-alueiden välillä

$\rho$  = tehollisen mitan kerroin

$\lambda$  = hoikkuuskerroin

$t$  = seinämän paksuus

$\epsilon_{yc}$  = materiaalin myötöpuristuman arvo

$k$  = seinämälevyn nurjahduskerroin ( $k=4$  molemmilta reunoiltaan tuetuille seinämille,  $k=0,43$  yhdeltä reunaltaan tuetuille seinämille)

$\omega$  = kotelorakenteen profiilin toistuvuuden välimatka

## 5.4 Väsymismitoitus

Ajoneuvoliikenteen ja rataliikenteen muovi- ja komposiittiputkisillat tulee mitoittaa väsymiselle CEN TR 1295-3 kohdan A.16.4 ja ATV-127 kohdan 9.7.4 mukaisesti. Kevyenliikenteen silloille ei tarvitse suorittaa väsymismitoitusta. Ajoneuvoliikenteen siltoja, joiden peitesyvyys on yli 1,5 m ei tarvitse mitoittaa väsymiselle. [15] [4]

Putkien kestävyys väsyttävien kuormien suhteen voidaan todeta kahdella tavalla. Molemmissa mitoitustavoissa, tapa 1 (Simplified method) ja tapa 2 (Advanced method), kestävyys todetaan vertaamalla väsymiskuormien aiheuttamaa putken jännitystä putken väsymiskestävyteen. Kestävyyden ja rasituksen suhteen tulee täyttää vaadittu kokonaisvarmuus.

Putken väsymismitoituksessa käytetään kokonaisvarmuuskertoimina seuraavia arvoja:

- Mitoitustapa 1 (Simplified method)  $F_{S,F1} = 2,0$
- Mitoitustapa 2 (Advanced method)  $F_{S,F2} = 1,0$

Väsyttävien ajoneuvoliikenteen kuormien vaikutuksia laskettaessa voidaan peitesyvyyden arvona käyttää 0,3 m todellista suurempaa peitesyvyyttä, mikäli ylittävän tien pintarakenteena on kuormia jakava päällyste.

Mitoitustavassa 1 kuormina käytetään Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” [9] mukaisten kuormakaavioiden LM1, LM2 ja LM3 tai LM71-35 aiheuttamia liikennekuormien jännityksiä (samat kuormat kuin staattisessa mitoituksessakin). Pysyvien kuormien aiheuttamia jännityksiä ei huomioida väsymismitoituksessa. Väsyttävien kuormien aiheuttamia jännityksiä kerrotaan kuormien väsymiskertoimella  $\alpha_F$ . Väsyttävien kuormien kertoimen arvona ajoneuvoliikenteenkuormille käytetään  $\alpha_F = 0,5$  ja rataliikenteenkuormille  $\alpha_F = 1,0$ . Saatua rasituksen arvoa verrataan putkimateriaalin 2 miljoonaa kuormitusyksiä vastaavaan väsymiskestävyden arvoon.

Mitoitustavassa 2 kuoriman käytetään Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” [9] mukaisten kuormakaavioiden FLM4 tai LM71-22,5 aiheuttamia liikennekuormien jännityksiä. Pysyvien kuormien aiheuttamia jännityksiä ei huomioida väsymismitoituksessa. Kuormakaavion FLM4 vaikutukset voidaan yksinkertaistaan vastaamaan 40 % kuormakaavion LM2 vaikutuksista Väyläviraston ohjeen ”Teräspuutkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” [18] kappaaleen 3.10.2 mukaisesti. Rataliikenteen kuormakaaviossa LM71-22,5 huomioidaan lisäksi

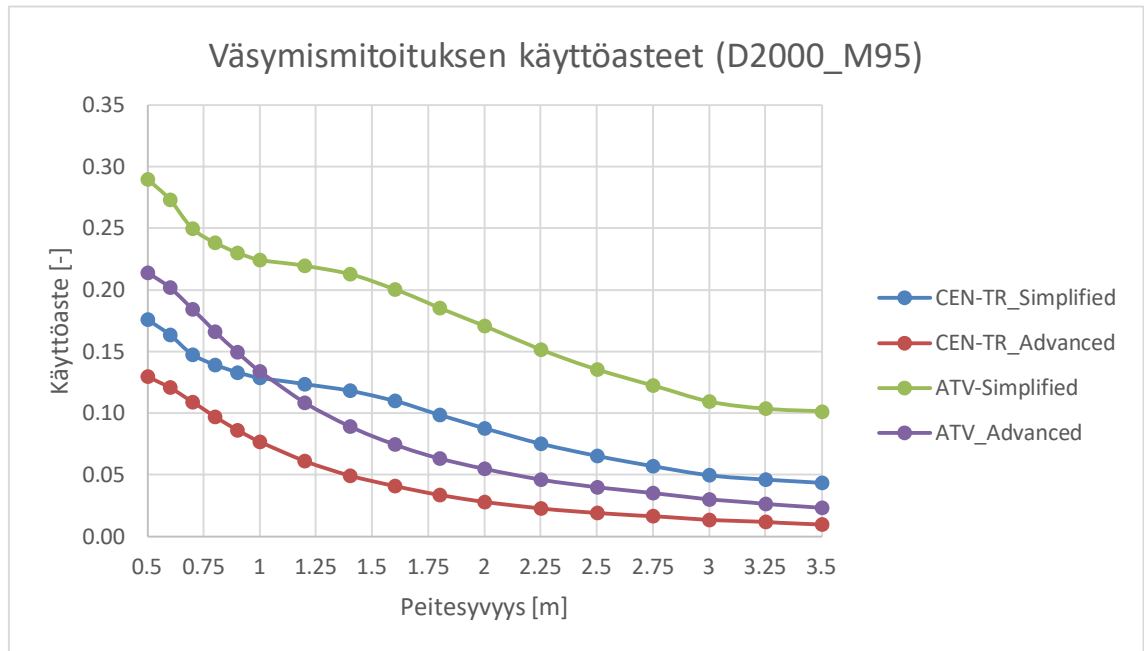
kertoimet  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  SFS-EN 1993-2 [8] mukaisesti. Väsymiskuormien aiheuttamia jännityksiä verrataan putkimateriaalin väsymiskestävyyden arvoon, joka määritellään sillan käyttöön ja liikennemäärän mukaisen laskennallisen kuormitus syklimäärän mukaisesti.

Kuvissa 65-70 on esitettyä väsymismitoitusten käyttöasteiden tuloksia kappaleessa 4 käsitellyille ajoneuvoliikenteen putkisilloille. Tulokset on laskettu molemmilla mitoitusmenetelmillä CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 ja molemmilla väsymismitoitustavoilla (Simplified ja Advanced). Mitoituksessa on käytetty kappaleessa 5.1 esitettyjä mitoitusperiaatteita. Mitoituksessa on käytetty silloille 100 vuoden käyttöikä ja liikenteenluokkana on käytetty luokkaa 1. Liikenneluokan 1 mukaiset kuormitus syklien määrät saadaan Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” [9] esitetyn taulukon B.4 mukaisesti. Edellä mainittu taulukko B.4 on esitettyä kuvassa 64.

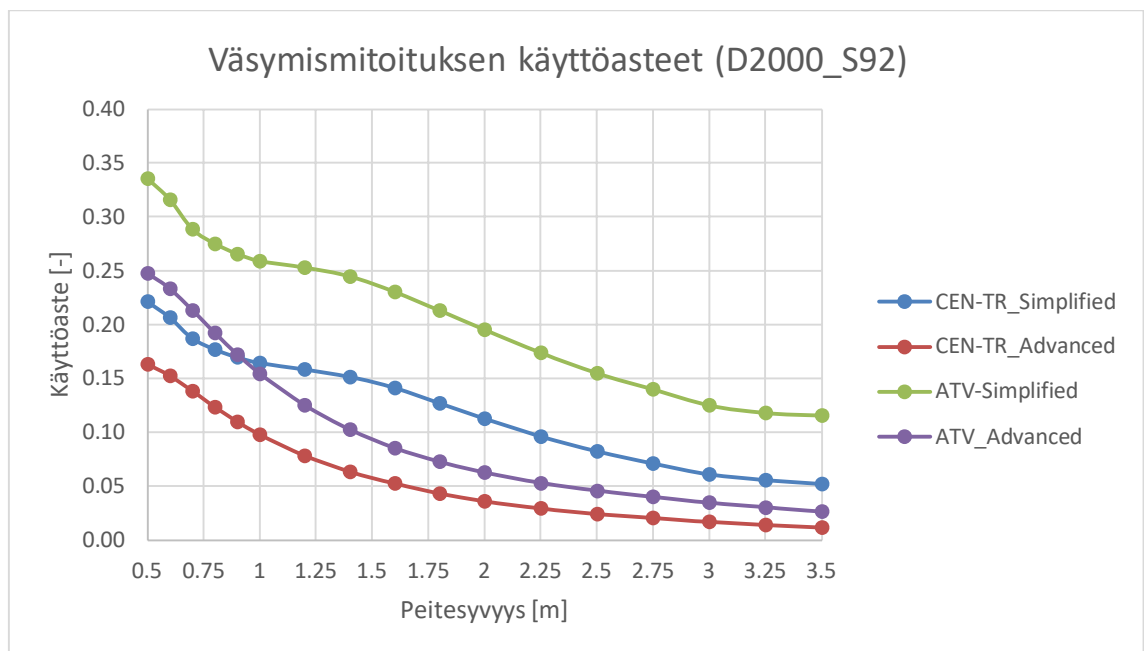
Liikenteen luokat (suluissa on esitetty kriteerit liikenteen luokan valinnalle: raskaiden ajoneuvojen määrä/vrk/suunta sillan käyttöiän alussa)		$N_{obs}$ vuotta ja hitaan liikenteen kaistaa kohti (Laskennassa käytetty raskaiden ajoneuvojen määrä/vuosi/suunta)
1	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tiet, joilla suuntaa kohti on vähintään 2 kaistaa, ja joilla kuorma-autoista muodostuva liikennemäärä on suuri (> 1200 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$2,0 \times 10^6$
2	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tiet, joilla kuorma-autoista muodostuva liikennemäärä on keskimääräinen (200...1200 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$0,5 \times 10^6$
3	Päätiet, joilla kuorma-autojen liikennemäärä on vähäinen (50...200 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$0,125 \times 10^6$
4	Paikallistiet, joilla kuorma-autojen liikennemäärä on vähäinen (< 50 raskasta ajoneuvoa /vrk/suunta)	$0,05 \times 10^6$

**Kuva 64.** Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” taulukko B.4. [9]

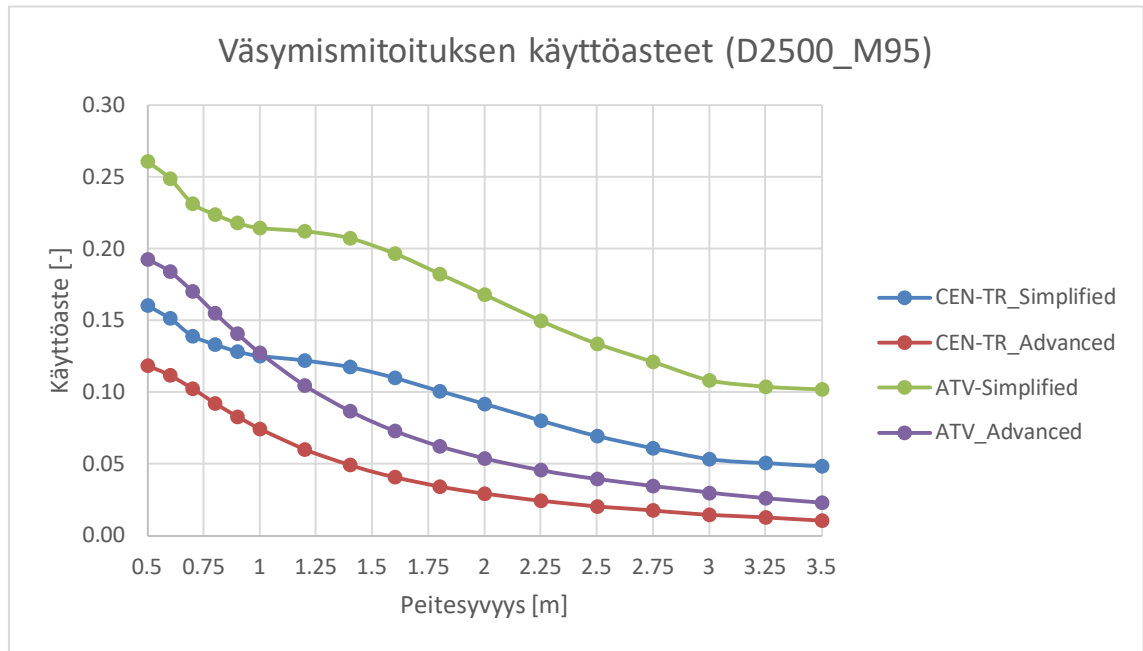
Laskentatavassa 1 putkimateriaalin 2 miljoona kuormitus sykliä vastaavana kestävyysnä käytettiin arvoa  $90,5 \text{ N/mm}^2$ . Laskentatavassa 2 kuormitus syklien määräksi saadaan 100 vuoden aikana liikenneluokalla 1 arvo 200 000 000. Tätä syklimäärää vastaavana materiaalin väsymiskestävyytenä käytettiin arvoa  $49,0 \text{ N/mm}^2$ .



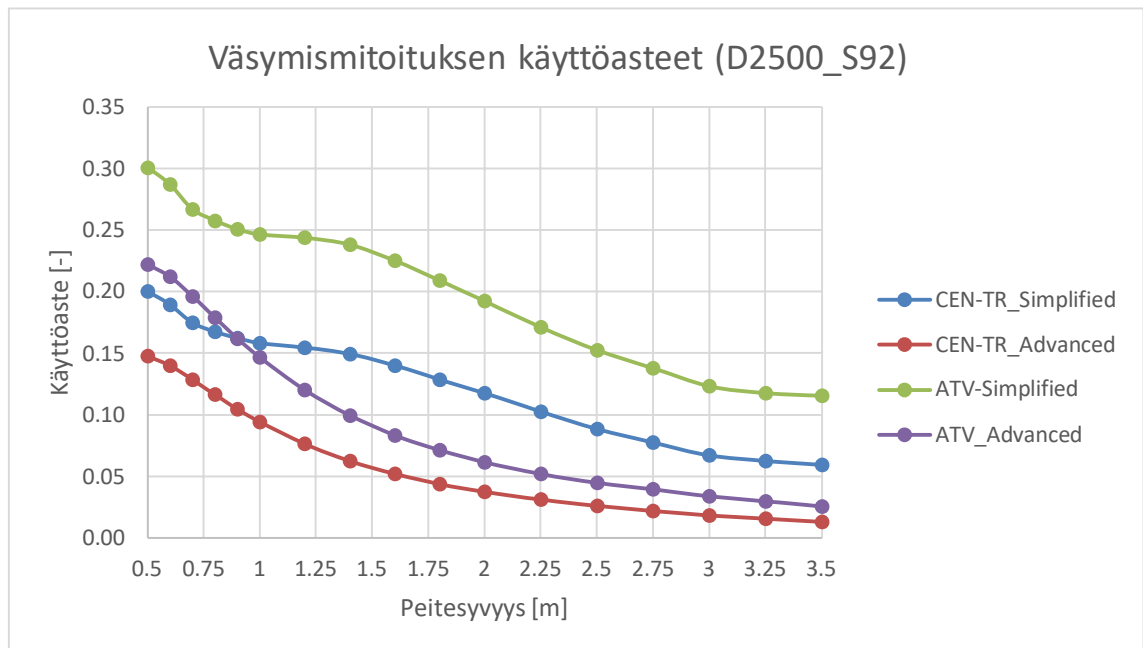
**Kuva 65.** Putkien väsymiskestävyyksien käyttöasteet. Putken koko D2000 ja ympäristäyttönä murske 95%.



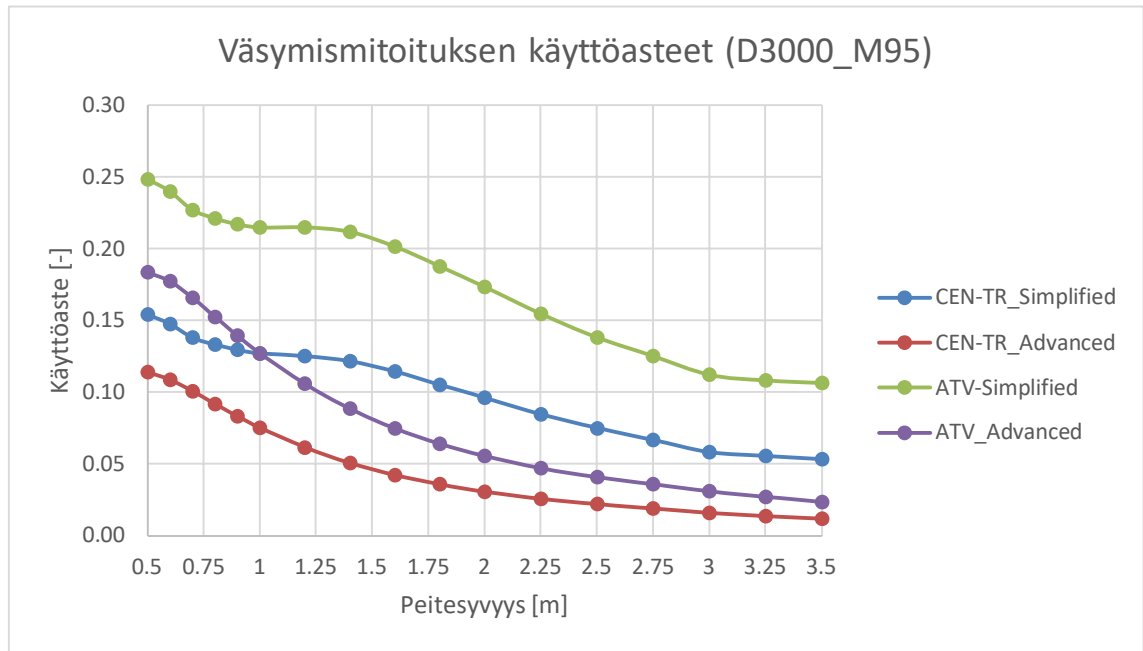
**Kuva 66.** Putkien väsymiskestävyyksien käyttöasteet. Putken koko D2000 ja ympäristäyttönä sora 92%.



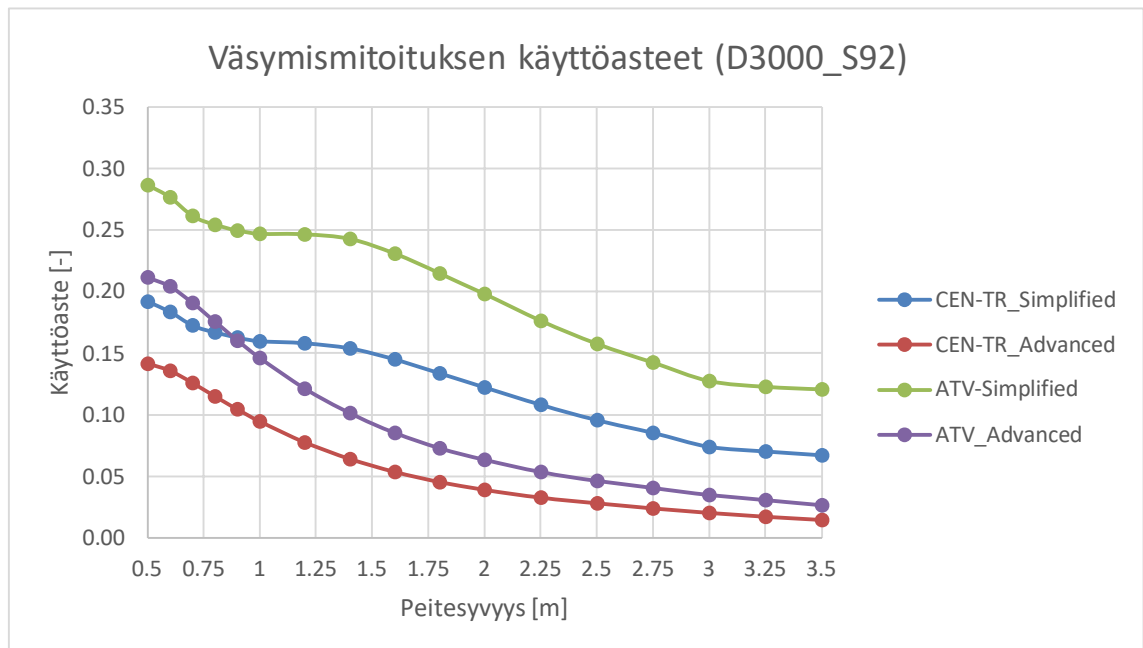
**Kuva 67.** Putkien väsymiskestävyyksien käyttöasteet. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä murske 95%.



**Kuva 68.** Putkien väsymiskestävyyksien käyttöasteet. Putken koko D2500 ja ympäristäytönä sora 92%.



**Kuva 69.** Putkien väsymiskestävyyksien käyttöasteet. Putken koko D3000 ja ympäristäytönä murske 95%.



**Kuva 70.** Putkien väsymiskestävyyksien käyttöasteet. Putken koko D3000 ja ympäristäytönä sora 92%.



Havaintoja edellä esitetyistä putkien väsymiskestävyyden kuvaajista:

- Kuvaajat ovat muodoltaan toistensa kaltaisia ”Simplified” ja ”Advanced” mitoitustapojen sisällä.
- Käyttöasteet pienentyvät peitesyvyyden kasvaessa liikennekuorman pienentyessä.
- Mitoitustavan 1 (Simplified method) mukaiset käyttöasteet jäävät aina mitoitustavan 2 (Advanced method) mukaisia tuloksia suuremmiksi CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 menetelmien sisällä.
- Kuvaajien yhdenmuotisuus ja ATV-127 mukaiset kauttaaltaan suuremmat käyttöasteet tukevat tavoitetta käyttää CEN/TR 1295-3 mukaista menetelmää pääasiallisena menetelmänä ja ATV-127 menetelmää vaihtoehtoisena mitoitusmenetelmänä tulevassa Väyläviraston suunnitteluohjeessa kappaleen 5.1 mukaisesti.

## 5.5 Nosteen vaikutukset

Putkien seinämien nurjahdustarkastelujen lisäksi nosteen vaikutus putkeen tulee huomioida myös varmistamalla, ettei putki pääse nousemaan kohti maanpintaa nostevoimasta. Ylösnousemistarkasteluissa putken omapainon ja putken päällä olevan täytön yhteisvaikutuksen tulee olla putkeen kohdistuvaa nostevoimaa suurempi. Vesitiiviiden kotelopoikkileikkausten vaikutus tulee myös huomioida nostevoiman suuruutta määritettäessä.

Nosteen vaikutus on merkittävin kokonaan tai osittain veden pinnan alla sijaitseviin ja samalla sisältään vedestä tyhjiin putkiin. Esimerkiksi pohjaveden pinnan alla olevat alikulkusillat kaukiorakenteiden yhteydessä tai eläinten kulkemiselle varatut kuivana pysyvät putket. Nostevoiman vaikutukset vesistösiltoihin ovat vähäisemmät.

## 6. YHTEENVETO

### 6.1 Vertailulaskelmien tulokset

CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mukaiset mitoitusmenetelmät pohjautuvat samaan mitoitus-teoriaan. Mitoitusmenetelmien tulokset taivutusmomenttien, normaalivoimien, jännitysten, venymien ja taipumien osalta vastaavat toisiaan hyvin, kunhan CEN/TR 1295-3 mitoituksessa valitaan käytettävät mitoitusperiaatteet kappaleen 6.2 mukaisesti.

ATV-127 menetelmän tulokset jäävät aina CEN/TR 1295-3 mukaisia tuloksia suuremmiksi rakenteeseen muodostuvien taivutusmomenttien, jännitysten ja venymien ja taipumien suhteen. Ero ei kuitenkaan ole merkittävän suuri. Esimerkiksi rakenteen kestävyysden (venymätarkastelut) osalta käyttöasteiden välinen ero on suuruusluokaltaan noin 5 prosenttiyksikköä vertailulaskelmien mukaisille rakenteille.

CEN/TR 1295-3 mukaista mitoitusmenetelmää voidaan käyttää tulevassa Väyläviraston muovi- ja komposiittiputkisiltojen suunnitteluohjeessa pääasiallisena mitoitusmenetelmänä ja ATV-127 mukainen menetelmä voidaan hyväksyä vaihtoehtoisena menetelmänä, jolla saadaan laskennaltaan monimutkaisempaan CEN/TR 1295-3 menetelmään nähden varmalla puolella olevat laskentatulokset.

### 6.2 Suunnitteluohjeen mitoitusperiaatteiden tiivistelmä

Väyläviraston ohjeissa ”Teräsputkisillat – Suunnitteluohje (LO 10/2014)” [18] esitetään Suomessa teräsputkisiltojen yhteydessä käytettävät täyttömateriaalit ja annetaan niille mitoituksessa käytettävät ominaisuudet. Muovi- ja komposiittiputkisiltojen yhteydessä käytetään samoja täyttömateriaaleja ja niiden ominaisuuksia kappaleen 4.4 mukaisesti. Ympäristäytteinä käytetään murskettä tai soraa, joiden parannettu proctor -tiiveysvaatimus valitaan väliltä 92%...95%. Ympäristäytöjen toteutus tehdään Väyläviraston ohjeen ”Teräsputkisiltojen toteutusohje (LO 5/2016)” [19] mukaisesti.

Muovi- ja komposiittiputkisillat mitoitetaan Väyläviraston eurokoodien soveltamisohjeen ”Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI1 (LO 24/2017)” [9] mukaisille kuormakaavioille. Kuormakaavioiden aiheuttamat jännitysten perusarvot putken laella lasketaan Boussinesqin teorian mukaisesti kappaleessa 5.2 esitetyllä tavalla. Kappaleen 5.2 kuvaajien arvoihin tulee kohdistaa kaikki mitoitusmenetelmien mukaiset lisäkertoimet ja lisätä kuormakaavioihin mahdollisesti sisältyvät tasaisesti jakautuneet pintakuromat lopullisten mitoituskuormien aikaansaamiseksi.

Käytettävät mitoitusoletukset CEN/TR 1295-3 mukaisessa mitoituksessa:

- Ympäristäytöjen tiiveysluokaksi valitaan W "well compacted material".
- Päällysteen jäykkyyden ja kuormien jakokyvyn mukaisia redusointikertoimia ei käytetä liikennekuormille.
- Taipumien laskennassa ei huomioida putken sisällä olevan mahdollisen veden vaikutuksia.
- Taipumien laskennassa ei huomioida putkeen muodostuvia alkumuodonmuutoksia (initial ovalization).

Putkien rakenteellinen kelpoisuus todetaan tarkastelemalla kappaleissa 5.3, 5.4 ja 5.5 esitetyt mitoitusvaatimusten toteutuminen. Tarkastelut sisältävät alla olevan listauksen mukaiset asiat:

- putken kestävyystarkastelut (jännitys/venymä)
- taipumatarkastelut
- seinämän nurjahdus/stabiliteettitarkastelut
- väsymismitoituksen
- nostevoiman tarkastelut

### 6.3 Jatkotutkimusaiheita

Tässä tutkimuksessa muovi- ja komposiittiputkisoltojen suunnitteluohjeeseen valittujen mitoitusmenetelmien kehitystä on syytä seurata tulevaisuudessa. Mitoitusmenetelmistä tullaan todennäköisesti julkaisemaan uusia versioita, jolloin uudistuskien vaikutukset Suomessa käytettävään menetelmään tulee arvioida ja mahdollisesti päivittää ohjeistusta uusimman tiedon mukaiseksi. Lisäksi tulee tarkkailla muitakin kuin tässä tutkimuksessa ohjeeseen valittuja mitoitusmenetelmiä ja niiden tulevaisuuden kehitystä. Tarvittaessa on syytä suorittaa vertailutarkasteluja ja mahdollisesti päivittää mitoitusmenetelmät kokonaisuudessaan alan uusimpien menetelmien mukaisiksi.

Tässä tutkimuksessa suunnitteluohjeeseen valittujen menetelmien tulosten ja Suomessa toteutettujen muovi- ja komposiittiputkisoltojen todellisten rasitusten ja muodonmuutosten välistä suhdetta tulee myös tarkastella. Esimerkiksi putkien pitkäaikaisten muodonmuutosten seuranta ja tulosten vertailua laskennallisiin arvoihin erilaisilla ympäristäyttö olosuhteilla. Tulosten pohjalta olisi mahdollista tarvittaessa säätää suunnittelussa käytettävä parametreja vastaamaan paremmin todellisuutta.

Vesistösiltoille määritellään tarvittavat virtaamavaatimukset siltapaikkakohtaisissa aukkolausunnoissa. Tarkasteltaessa pelkästään putkien poikkileikkausten virtaamaominaisuuksia, voidaan todeta, että sileäpintaisten muovi- ja komposiittiputkien virtaamaominaisuudet ovat aallotettuja profiileja tehokkaammat. Siltapaikan kokonaisuuden virtaamaominaisuuksiin vaikuttaa putken lisäksi kuitenkin myös uoman ominaisuudet ennen ja jälkeen putkisillan ja siltapaikan valuma-alueen ominaisuudet. Mikäli voidaan osoittaa, että erilaisten putkien pinnankarheudella on merkittävä vaikutus siltapaikan kokonaisvirtaamamääriin, olisi tällöin mahdollista käyttää pienempiä putkikokoja riittävän virtaaman aikaansaamiseen. Pienempiä putkikokoja käytettäessä säästettäisiin putken materiaaleissa ja tarvittavassa kaivannon syvyydessä ja leveydessä. Pienempi kaivanto voi puolestaan mahdollistaa vähäisemmät kiertotierakenteet työn aikana. Edellä mainituilla säästöillä olisi positiivinen taloudellinen vaikutus putkisiltaurakan kokonaiskustannuksiin.

# LÄHTEET

- [1] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. ISBN 978-1-56051-523-4.
- [2] AS/NZS 2566.1, Buried Flexible pipelines – Part 1: Structural Design. 1998.
- [3] AS/NZS 2566.2, Buried Flexible pipelines – Part 2: Installation. 1998.
- [4] ATV-DVWK-A 127E Static Calculation of Drains and Sewers 3rd Edition, August 2000. ISBN 3-934984-16-9
- [5] AWWA M55, PE Pipe - Design and Installation. ISBN 1-58321-387-2.
- [6] BS 9295, Guide to the structural design of buried pipes. 2020
- [7] Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat SFS-EN 1991-2. 144 s.
- [8] Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 2: Terässillat, SFS-EN 1993-2. 104 s.
- [9] Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet - NCCI 1, 6.12.2017, Liikenneviraston ohjeita 24/2017, ISBN 978-952-317-486-3. 91 s.
- [10] Fascicule 70-1, Fourniture, pose et réhabilitation de canalisations d'eaux à écoulement à surface libre. 2019.
- [11] Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) pipes - Determination of the long-term specific ring creep stiffness under wet conditions and calculation of the wet creep factor. ISO 10468. 16 s.
- [12] InfraRYL 2010. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 1 Väylät ja alueet. Helsinki. Rakennustieto Oy 2010. ISBN 978-951-682-958-9
- [13] Murthy V.N.S., Geotechnical Engineering – Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering. October 2002. CRC Press. ISBN 9780824708733. 1056 s.
- [14] Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3 Radan rakenne, 14.3.2016, Liikenneviraston ohjeita 6/2016, ISBN 978-952-317-246-3. 100 s.
- [15] Structural design of buried pipelines under various conditions of loading. Part 3: Common method. CEN/TR 1295-3. 206s
- [16] Teiden ja ratojen kuivatuksen suunnittelu. 7.3.2013, Liikenneviraston ohjeita 5/2013, ISBN 978-952-255-250-1. 118 s.
- [17] Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. February 1996. ISBN: 978-0-471-08658-1. 592 s.
- [18] Teräsputkisillat - Suunnitteluohje, 25.2.2014, Liikenneviraston ohjeita 10/2014, ISBN 978-952-255-428-4. 98 s.

- [19] Teräsputkisoltojen toteutusohje, 9.3.2016, Liikenneviraston ohjeita 5/2016, ISBN 978-952-317-236-4. 62 s.
- [20] Thermoplastics pipes. Determination of ring stiffness. SFS-EN ISO 9969. 12 s.
- [21] Thermoplastics pipes. Determination of creep ratio. SFS-EN ISO 9967. 17 s.
- [22] UNE 53331, Plásticos. Tuberías de Poli(cloruro de vinilo) no plastificado (PVC-U), Poli(cloruro de vinilo) orientado (PVC-O), Polietileno (PE) y Polipropileno (PP). Criterio para la comprobación de los tubos a utilizar en conducciones con y sin presión sometidos a cargas externas. 2020.
- [23] VAV P92, Anvisningar för projektering och utförande av markförlagda självfallsledningar av plast. 2005.
- [24] Väyläviraston sillat 1.1.2020 - Sillaston rakenne, palvelutaso ja kunto. Väyläviraston julkaisuja 46/2020, ISBN 978-952-317-801-4. 84 s.
- [25] ÖNORM B 5012, Structural design of buried water and sewerage pipelines. 2008.

## LIITE A: MITOITUSESIMERKIT

Tässä liitteessä on esitetty laskentaesimerkit CEN/TR 1295-3 ja ATV-127 mitoitusmenetelmistä. Mitoituslaskelmat on laadittu kappaleen 4 vertailulaskelmissa käytetyllä tämän tutkimuksen tekijän laatimalla erillisellä Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla laaditulla laskentapohjalla. Esimerkkilaskelmilla on pyritty luomaan kokonaiskuvaa laskelmien kulusta ja tarkasteltavista asioista. Molempien menetelmien mukaiset laskennat on tehty samalle putkelle samoissa olosuhteissa alla olevan listauksen mukaisesti.

Putken tiedot:

- komposiittiputki D2500
- seinämän vahvuus  $t = 39 \text{ mm}$
- tilavuuspaino  $\gamma_P = 21,0 \text{ kN/m}^3$
- lyhytaikainen rengasjäykkyys  $SN_{ST} = 5000 \text{ N/m}^2$
- pitkäaikainen rengasjäykkyys  $SN_{LT} = 2500 \text{ N/m}^2$
- lyhytaikainen suhteellinen murtovenymä  $\Delta d_{frac}/d_m = 20,0 \%$
- pitkäaikainen suhteellinen murtovenymä  $\Delta d_{frac}/d_m = 12,0 \%$

Ympäristäytön ja kaivannon tiedot:

- peitesyvyys  $h = 0,7 \text{ m}$
- täyttömateriaalia ja tiiveys = Murske 95%
- kaivannon leveys pohjalla  $b_{invert} = 5,71 \text{ m} (2 \cdot D)$
- ympäristäytön luokitukset ET1a + I1 ja A1 + B1 (pohjan tuentakulma  $120^\circ$ )
- ympäristäytön tiivistysluokka "W" (well compacted material)

Kuormitus:

- ajoneuvoliikenteen kuormakaaviot LM1, LM2 ja LM3

Mitoitusperiaatteet:

- siiloteorian mukaisia redusointikertoimia hyödynnetään
- päällysteen jäykkyyden ja kuormien jakamiskyvyn mukaisia redusointikertoimia ei hyödynnetä
- Taipumien laskennassa ei huomioida putken sisällä olevan veden vaikutuksia eikä putken muodostuvia alkumuodonmuutoksia (initial ovalization)

## PIPE DATA (CEN-TR 1295-3)

<b>Pipe properties:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
External diameter	$d_e$	mm	2555
Internal diameter	$d_i$	mm	2477
Mean diameter	$d_m$	mm	2516
Mean radius	$r_m$	mm	1258
Unit weight of pipe material	$\gamma_P$	kN/m <sup>3</sup>	21,0

<b>Material properties:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Stiffness calculation method: <b>S / E ?</b>	----	----	<b>S</b>
Nominal stiffness (Short.t.)	$SN_{ST}$	N/m <sup>2</sup>	5000
Nominal stiffness (Long.t.)	$SN_{LT}$	N/m <sup>2</sup>	2500
Modulus of elasticity (Short.t.)	$E_{P,ST}$	N/mm <sup>2</sup>	----
Modulus of elasticity (Long.t.)	$E_{P,LT}$	N/mm <sup>2</sup>	----
Relative failure strain (Short.t.)	$\Delta d_{frac}/d_m$	%	20
Relative failure strain (Long.t.)	$\Delta d_{frac}/d_m$	%	12
Bending tensile strenght (Short.t.)	$\sigma_{ult,ST}$	N/mm <sup>2</sup>	----
Bending tensile strenght (Long.t.)	$\sigma_{ult,LT}$	N/mm <sup>2</sup>	----

<b>Cross-section properties:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Wall thickness	$t$	mm	39
Hollow section: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>N</b>
Flange width (outer)	$t_{f,outer}$	mm	----
Flange width (inner)	$t_{f,inner}$	mm	----
Web width	$t_w$	mm	----
Web spacing	$s_w$	mm	----
Elastic neutral axis from inner surface	E.N.A.	mm	19,5
Cross-section area	$A$	mm <sup>2</sup> /mm	39,0
Moment of resistance (outer)	$W_{outer}$	mm <sup>3</sup> /mm	254
Moment of resistance (inner)	$W_{inner}$	mm <sup>3</sup> /mm	254
Moment of inertia	$I$	mm <sup>4</sup> /mm	4 943

<b>Initial ovalization:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Initial ovalization in M&N-values: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>N</b>
Initial ovalization in deformations: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>N</b>

<b>Safety factors and design limits:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Safety against failure due to rupture	$F_{S,R}$	----	2,0
Safety against failure due to instability	$F_{S,I}$	----	2,0
Safety against failure due to fatigue (simp.)	$F_{S,F1}$	----	2,0
Safety against failure due to fatigue (adv.)	$F_{S,F2}$	----	1,0
Limit of vertical pipe deformation	$\delta_{v,\%,max}$	%	±5,0
Local imperfections	$\delta_{v,\%,imperf.}$	%	±1,0



## SOIL DATA (CEN-TR 1295-3)

<b>Trench data:</b>			
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Covering height	h	m	0,700
Embankment angle	$\beta$	°	45
Trench width at pipe invert	$b_{invert}$	m	5,710
Trench width at pipe crown	b	m	10,820
Installation condition	I	----	1
Embedment type	ET	----	1a
Compaction class: <u>Well</u> / Moderate / None ?	CC	----	W
Compaction correction factor	$f_c$	----	1,00
Compaction factor initial ovalization	$K_{io}$	----	0,70
Relative projection	a	----	1,00
Application of "hd" - soil load: <u>Yes</u> / No ?	----	----	Y
*ground water effecting "hd" -soil: <u>Yes</u> / No ?	----	----	Y
<b>Covering soil / Backfilling:</b>			
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Soil group	$G_s$	----	M
Unit weight of soil material	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for time effects	$f_{R,T}$	----	1,00
Exponent of density dependency	z	----	----
Exponent of covering depth dependency	u	----	----
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Design value of deformation modulus	$E_{tt,ST=LT}$	N/mm <sup>2</sup>	48,6
<b>Sidefilling / Pipeline zone filling:</b>			
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Soil group	$G_s$	----	M
Unit weight of soil material	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for time effects	$f_{R,T}$	----	1,00
Exponent of density dependency	z	----	----
Exponent of covering depth dependency	u	----	----
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Basic value of deformation modulus	$E_{ts,h}$	N/mm <sup>2</sup>	48,6
Reduction factor for groundwater	$f_{R,GW}$	----	1,000
Reduction factor for narrow trench	$f_{R,TW}$	----	1,000
Design value of deformation modulus	$E_{ts,ST=LT}$	N/mm <sup>2</sup>	48,6
<b>Surrounding soil next to the pipe:</b>			
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Soil modulus value type: <u>Basic</u> / Native?	----	----	B
Soil group	$G_s$	----	M
Unit weight of soil material	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for time effects	$f_{R,T}$	----	1,00
Exponent of density dependency	z	----	----
Exponent of covering depth dependency	u	----	----
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Deformation modulus	$E_{ns}$	N/mm <sup>2</sup>	48,6
<b>Surrounding soil under the pipe:</b>			
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Calculation method $E_{nb} = 10 * E_{tt,h}$ : <u>Yes</u> / No?	----	----	N
Soil modulus value type: <u>Basic</u> / Native?	----	----	B
Soil group	$G_s$	----	M
Unit weight of soil material	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for time effects	$f_{R,T}$	----	1,00
Exponent of density dependency	z	----	----
Exponent of covering depth dependency	u	----	----
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Deformation modulus	$E_{nb}$	N/mm <sup>2</sup>	48,6

## **LOAD DATA (CEN-TR 1295-3)**

<b><u>Silo theory:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Application of silo theory: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>Y</b>
Trench walls retained long-term: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>Y</b>
Soil pressure ratio in the backfill	$K_1$	----	0,400
Wall friction angle	$\Phi_1$	----	25,333
Silo theory reduction factor (basic)	$K_{90}$	----	0,988
Silo theory reduction factor (sloped)	$K_{\beta}$	----	0,994
Silo theory reduction f. (basic, area load)	$K_{a,90}$	----	0,976
Silo theory reduction f. (sloped, area load)	$K_{a\beta}$	----	0,988
<b><u>Earth load:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Soil stress due to earth load	$P_{S,v}$	kN/m <sup>2</sup>	14,6
<b><u>Water load:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Water level above pipe invert (outer side)	$h_{w,invert}$	m	1,000
Unit weight of water	$\gamma_w$	kN/m <sup>3</sup>	10,0
Water filling in M&N-values: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>Y</b>
*water filling only as amplifying effect ?	----	----	<b>Y</b>
Water filling in deformation calc.: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>N</b>
Water filling in stability calc.: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>Y</b>
Water filling in uplift calc.: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>Y</b>
<b><u>Additional rules for traffic loads:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Application of dynamic reductions: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>Y</b>
Reduction of dynamic amplification factor	$r_d$	----	1,00
<b><u>Traffic loads (basic design):</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Boussinesq stress due to LM1 axle load	$p_{LM1,axle}$	kN/m <sup>2</sup>	146,8
Boussinesq stress due to LM1 UD-load	$p_{LM1,UDL}$	kN/m <sup>2</sup>	9,0
Boussinesq stress due to LM2 axle load	$p_{LM2,axle}$	kN/m <sup>2</sup>	162,7
Boussinesq stress due to LM3 UD-load	$p_{LM3,UDL}$	kN/m <sup>2</sup>	45,0
Pavement with load distribution: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>N</b>
Pavement type: <b>Rigid / Flexible / None ?</b>	----	----	<b>N</b>
Road formation and transitory traffic factor	$D_{T,mod}$	----	1,000
Correction factor for axle load spread	$a_{traffic}$	----	0,532
Resulting soil stress due to LM1	$p_{T,v,LM1}$	kN/m <sup>2</sup>	86,9
Resulting soil stress due to LM2	$p_{T,v,LM2}$	kN/m <sup>2</sup>	86,5
Resulting soil stress due to LM3	$p_{T,v,LM3}$	kN/m <sup>2</sup>	44,5
Maximum soil stress due to traffic loads	$p_{T,v}$	kN/m <sup>2</sup>	86,9
<b><u>Traffic loads (changes for fatigue design):</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Pavement with load distribution: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>N</b>
Addition to basic covering height	$\Delta h_{fatigue}$	m	0,000
Covering height for fatigue design	$h_{fatigue}$	m	0,700
Boussinesq stress due to LM1 axle load	$p_{LM1,axle, fat}$	kN/m <sup>2</sup>	146,8
Boussinesq stress due to LM2 axle load	$p_{LM2,axle, fat}$	kN/m <sup>2</sup>	162,7
<b>Both / Simplified / Advanced / None ?</b>	----	----	<b>B</b>
<b><u>Load for simplified fatigue verification :</u></b>			
* basic fatigue traffic load (LM1...LM3)	$p_{V,fat}$	kN/m <sup>2</sup>	86,9
* fatigue traffic load reduction factor	$\alpha_v$	----	0,50
* design fatigue traffic load	dyn $p_v$	kN/m <sup>2</sup>	43,5
<b><u>Load for advanced fatigue verification :</u></b>			
* fatigue soil stress due to LM2	$p_{V,LM2,fat}$	kN/m <sup>2</sup>	86,5
* LM2 conversion factor to FLM4	$\beta_v$	----	0,40
* design fatigue traffic load	dyn $p_v$	kN/m <sup>2</sup>	34,6

## **LOAD DISTRIBUTION (between soil and pipe) (CEN-TR 1295-3)**

<b><u>Concentration and stiffness calculations:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Pipe stiffness	$S_p$	N/mm <sup>2</sup>	0,0050	0,0025
Modulus of elasticity of pipe material	$E_p$	N/mm <sup>2</sup>	16110	8055
Soil pressure ratio in the sidefill	$K_2$	----	0,400	0,400
Vertical bedding stiffness	$S_{Bv}$	N/mm <sup>2</sup>	48,640	48,640
Vertical deformation ratio	$\chi$	----	65,15	130,29
Deformation criterion	----	----	flexible	flexible
Deformation criterion verification	----	----	OK!	OK!
Vertical support angle	$\alpha_v$	°	120	120
Horizontal support angle	$\alpha_h$	°	120	120
Soil pressure ratio in the sidefill	$F_1$	----	1,667	1,667
Soil pressure ratio in the sidefill	$F_2$	----	0,283	0,283
Valuation constant	$\Delta f$	----	1,667	1,667
Horizontal embedment stiffness coefficient	$\zeta$	----	1,000	1,000
Horizontal bedding stiffness	$S_{Bh}$	N/mm <sup>2</sup>	29,178	29,178
System stiffness	$V_{PS}$	----	0,0014	0,0007
Effective relative projection	$a_{eff}$	----	1,000	1,000
Maximum concentration factor	$\lambda_{max}$	----	1,038	1,038
Deformation coefficient (horizontal)	$C_{hv}$	----	0,0891	0,0891
Deformation coefficient (horizontal)	$C_{hh}$	----	-0,0836	-0,0836
Deformation coefficient (horizontal)	$C_{hd}$	----	-0,0418	-0,0418
Deformation coefficient (horizontal)	$C_{h,ow}$	----	0,1654	0,1654
Deformation coefficient (horizontal)	$C_{h,w}$	----	0,0823	0,0823
Deformation coefficient (horizontal)	$C_{hh}^*$	----	-0,0659	-0,0659
Deformation coefficient (vertical)	$C_{vv}$	----	-0,0893	-0,0893
Deformation coefficient (vertical)	$C_{vh}$	----	0,0836	0,0836
Deformation coefficient (vertical)	$C_{vd}$	----	0,0418	0,0418
Deformation coefficient (vertical)	$C_{v,ow}$	----	-0,1682	-0,1682
Deformation coefficient (vertical)	$C_{v,w}$	----	-0,0846	-0,0846
Deformation coefficient (vertical)	$C_{vh}^*$	----	0,0641	0,0641
Coefficient for bedding reaction pressure	$K^*$	----	1,324	1,337
Deformation coefficient	$C_v^*$	----	-0,0044	-0,0035
Stiffness ratio	$V_S$	----	0,187	0,117
Concentration factor above pipe (initial)	$\lambda_p$	----	0,905	0,851
Concentration factor above pipe (modified)	$\lambda_{pT}$	----	0,905	0,851
Upper limit of concentration factor	$\lambda_{up}$	----	3,895	3,895
Concentration factor above pipe (final)	$\lambda_{pT}$	----	0,905	0,851
Concentration factor adjacent to pipe	$\lambda_s$	----	1,032	1,050

## **STRESS DISTRIBUTION (at pipe circumference) (CEN-TR 1295-3)**

<b><u>Resulting stresses at pipe circumference:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>L.T. (1,lt)</u></b>	<b><u>L.T. (2,st)</u></b>
Vertical stress on the pipe	$q_{v,i}$	kN/m <sup>2</sup>	91,8	12,4	78,6
Horizontal stress on the pipe	$q_{h,i}$	kN/m <sup>2</sup>	6,0	6,1	0,0
Horizontal stress (depth dependant)	$q_{h,d,i}$	kN/m <sup>2</sup>	11,2	11,2	0,0
Horizontal stress from initial ovalization	$q_{io}$	kN/m <sup>2</sup>	0,0	0,0	0,0

<b><u>Resulting bedding reaction pressures:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>L.T. (1,lt)</u></b>	<b><u>L.T. (2,st)</u></b>
Horizontal bedding reaction pressure	$q_{h,i}^*$	kN/m <sup>2</sup>	109,4	3,9	104,4
Horizontal bedding reaction press. (water)	$q_{hw}^*$	kN/m <sup>2</sup>	15,4	15,6	0,0



## MOMENTS AND NORMAL FORCES (CEN-TR 1295-3)

<u>PIPE CROWN (TOP):</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>Short.t.</u>	<u>L.T. (1,lt)</u>	<u>L.T. (2,st)</u>
Moment from vertical total load	M <sub>qv</sub>	kNm/m	37,9	5,1	32,5
Moment from side pressure	M <sub>qh</sub>	kNm/m	-2,4	-2,4	0,0
Moment from "hd" side pressure	M <sub>qhd</sub>	kNm/m	-1,9	-1,9	0,0
Moment from side bedding reaction	M <sub>qh</sub> *	kNm/m	-31,3	-1,1	-29,9
Moment from side bedding reaction (water)	M <sub>qhw</sub> *	kNm/m	<del>4,4</del>	<del>4,5</del>	0,0
Moment from dead weight	M <sub>ow</sub>	kNm/m	0,5	0,5	0,0
Moment from initial ovalization	M <sub>io</sub>	kNm/m	0,0	0,0	0,0
Moment from water filling	M <sub>w</sub>	kNm/m	<del>3,8</del>	<del>3,8</del>	0,0
<b>Total sum of moments</b>	<b>ΣM</b>	<b>kNm/m</b>	<b>2,9</b>	<b>0,2</b>	<b>2,6</b>
Normal force from vertical total load	N <sub>qv</sub>	kN/m	3,1	0,4	2,7
Normal force from side pressure	N <sub>qh</sub>	kN/m	-7,6	-7,7	0,0
Normal force from "hd" side pressure	N <sub>qhd</sub>	kN/m	-5,9	-5,9	0,0
Normal F. from side bedding reaction	N <sub>qh</sub> *	kN/m	-79,4	-2,8	-75,8
Normal F. from side bedding react. (water)	N <sub>qhw</sub> *	kN/m	-11,2	-11,3	0,0
Normal F. from dead weight	N <sub>ow</sub>	kN/m	0,3	0,3	0,0
Normal force from initial ovalization	N <sub>io</sub>	kN/m	0,0	0,0	0,0
Normal force from water filling	N <sub>w</sub>	kN/m	9,9	9,9	0,0
<b>Total sum of normal forces</b>	<b>ΣN</b>	<b>kN/m</b>	<b>-90,9</b>	<b>-17,2</b>	<b>-73,1</b>
<u>PIPE HAUNCH (SPRINGLINE):</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>Short.t.</u>	<u>L.T. (1,lt)</u>	<u>L.T. (2,st)</u>
Moment from vertical total load	M <sub>qv</sub>	kNm/m	-38,5	-5,2	-33,0
Moment from side pressure	M <sub>qh</sub>	kNm/m	2,4	2,4	0,0
Moment from "hd" side pressure	M <sub>qhd</sub>	kNm/m	2,2	2,2	0,0
Moment from side bedding reaction	M <sub>qh</sub> *	kNm/m	36,0	1,3	34,4
Moment from side bedding reaction (water)	M <sub>qhw</sub> *	kNm/m	5,1	5,1	0,0
Moment from dead weight	M <sub>ow</sub>	kNm/m	-0,6	-0,6	0,0
Moment from initial ovalization	M <sub>io</sub>	kNm/m	0,0	0,0	0,0
Moment from water filling	M <sub>w</sub>	kNm/m	-4,4	-4,4	0,0
<b>Total sum of moments</b>	<b>ΣM</b>	<b>kNm/m</b>	<b>2,2</b>	<b>0,9</b>	<b>1,4</b>
Normal force from vertical total load	N <sub>qv</sub>	kN/m	-115,5	-15,6	-98,9
Normal force from side pressure	N <sub>qh</sub>	kN/m	0,0	0,0	0,0
Normal force from "hd" side pressure	N <sub>qhd</sub>	kN/m	0,0	0,0	0,0
Normal F. from side bedding reaction	N <sub>qh</sub> *	kN/m	0,0	0,0	0,0
Normal F. from side bedding react. (water)	N <sub>qhw</sub> *	kN/m	<del>0,0</del>	<del>0,0</del>	0,0
Normal F. from dead weight	N <sub>ow</sub>	kN/m	-1,6	-1,6	0,0
Normal force from initial ovalization	N <sub>io</sub>	kN/m	0,0	0,0	0,0
Normal force from water filling	N <sub>w</sub>	kN/m	<del>3,4</del>	<del>3,4</del>	0,0
<b>Total sum of normal forces</b>	<b>ΣN</b>	<b>kN/m</b>	<b>-117,1</b>	<b>-17,3</b>	<b>-98,9</b>
<u>PIPE INVERT (BOTTOM):</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>Short.t.</u>	<u>L.T. (1,lt)</u>	<u>L.T. (2,st)</u>
Moment from vertical total load	M <sub>qv</sub>	kNm/m	40,0	5,4	34,2
Moment from side pressure	M <sub>qh</sub>	kNm/m	-2,4	-2,4	0,0
Moment from "hd" side pressure	M <sub>qhd</sub>	kNm/m	-2,6	-2,6	0,0
Moment from side bedding reaction	M <sub>qh</sub> *	kNm/m	-31,3	-1,1	-29,9
Moment from side bedding reaction (water)	M <sub>qhw</sub> *	kNm/m	-4,4	-4,5	0,0
Moment from dead weight	M <sub>ow</sub>	kNm/m	0,7	0,7	0,0
Moment from initial ovalization	M <sub>io</sub>	kNm/m	0,0	0,0	0,0
Moment from water filling	M <sub>w</sub>	kNm/m	5,2	5,2	0,0
<b>Total sum of moments</b>	<b>ΣM</b>	<b>kNm/m</b>	<b>5,1</b>	<b>0,7</b>	<b>4,3</b>
Normal force from vertical total load	N <sub>qv</sub>	kN/m	-3,1	-0,4	-2,7
Normal force from side pressure	N <sub>qh</sub>	kN/m	-7,6	-7,7	0,0
Normal force from "hd" side pressure	N <sub>qhd</sub>	kN/m	-11,9	-11,9	0,0
Normal F. from side bedding reaction	N <sub>qh</sub> *	kN/m	-86,3	-3,1	-82,3
Normal F. from side bedding react. (water)	N <sub>qhw</sub> *	kN/m	<del>12,2</del>	<del>12,3</del>	0,0
Normal F. from dead weight	N <sub>ow</sub>	kN/m	-0,3	-0,3	0,0
Normal force from initial ovalization	N <sub>io</sub>	kN/m	0,0	0,0	0,0
Normal force from water filling	N <sub>w</sub>	kN/m	<del>21,8</del>	<del>21,8</del>	0,0
<b>Total sum of normal forces</b>	<b>ΣN</b>	<b>kN/m</b>	<b>-109,1</b>	<b>-23,3</b>	<b>-85,0</b>

## **STRESSES AND ELONGATIONS (CEN-TR 1295-3)**

<b>Curvature correction for pipe profile</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>		
Curvature correction for outer edge fiber	$C_{co}$	----	0,990		
Curvature correction for inner edge fiber	$C_{ci}$	----	1,010		
<b>Stress verification:</b>					
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Short.t.</b>	<b>L.T. (1,lt)</b>	<b>L.T. (2,st)</b>
Stress at the pipe crown (outer fiber)	$\sigma_{crown,o}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Stress at the pipe crown (inner fiber)	$\sigma_{crown,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Stress at the pipe haunch (outer fiber)	$\sigma_{haunch,o}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Stress at the pipe haunch (inner fiber)	$\sigma_{haunch,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Stress at the pipe invert (outer fiber)	$\sigma_{invert,o}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Stress at the pipe invert (inner fiber)	$\sigma_{invert,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Bending tensile strenght	$\sigma_{ult,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----	----
Resulting coefficient of safety	$\eta_{S,R}$	----	----	----	----
Necessary coefficient of safety	$F_{S,R}$	----	----	----	----
Ratio of utilization	R.o.U.	----	----	----	----
Results of necessary stress proofs	----	----	----	----	----
<b>Elongation verification:</b>					
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Short.t.</b>	<b>L.T. (1,lt)</b>	<b>L.T. (2,st)</b>
Elongation at the pipe crown (outer fiber)	$\epsilon_{crown,o}$	%	-0,08	-0,02	-0,07
Elongation at the pipe crown (inner fiber)	$\epsilon_{crown,i}$	%	0,06	0,01	0,05
Elongation at the pipe haunch (outer fiber)	$\epsilon_{haunch,o}$	%	-0,07	-0,05	-0,05
Elongation at the pipe haunch (inner fiber)	$\epsilon_{haunch,i}$	%	0,04	0,04	0,02
Elongation at the pipe invert (outer fiber)	$\epsilon_{invert,o}$	%	-0,14	-0,04	-0,12
Elongation at the pipe invert (inner fiber)	$\epsilon_{invert,i}$	%	0,11	0,03	0,09
Ultimate elongation limit	$\epsilon_{ult,i}$	%	1,33	0,80	1,33
Resulting coefficient of safety	$\eta_{S,R}$	----	9,4	7,2	
Necessary coefficient of safety	$F_{S,R}$	----	2,0	2,0	
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,21	0,28	
Results of necessary elongation proofs	----	----	OK!	OK!	

## **DEFORMATIONS (CEN-TR 1295-3)**

<b>Horizontal deformation:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Short.t.</b>	<b>L.T. (1,lt)</b>	<b>L.T. (2,st)</b>
Horizontal displacement coefficient	Z6	mm <sup>3</sup> /N	31 450	62 900	31 450
Horizontal displacement at springline	$\Delta h_{o,i}$	mm	231	16	220
Horizontal displacement at springline (water)	$\Delta h_{o,w}$	mm	33	65	0
Parabolic compliance factor	$C_P^*$	mm <sup>3</sup> /N	-2 073	-4 146	-2 073
Resistance of the horizontal soil column	$R_S$	N/mm <sup>3</sup>	0,0268	0,0268	0,0268
Compatible horizontal displacement	$\Delta h_i$	mm	4,1	0,1	3,9
Compatible horizontal displacement (water)	$\Delta h_w$	mm	0,6	0,6	0,0
Horizontal deformation from initial ovalization	$\delta_{h,io}$	----	0,000	0,000	0,000
Total relative horizontal deformation	$\delta_{h,\%tot}$	%	0,2	0,2	
Total change of horizontal diameter	$\Delta h$	mm	4,7	4,6	
<b>Vertical deformation verification:</b>					
	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Short.t.</b>	<b>L.T. (1,lt)</b>	<b>L.T. (2,st)</b>
Vertical deformation from initial ovalization	$\delta_{v,io}$	----	0,000	0,000	0,000
Vertical deformation from own weight	$\delta_{v,ow}$	----	0,000	0,000	0,000
Vertical deformation due to water fill	$\delta_{v,w}$	----	0,000	0,000	0,000
Vertical deformation from soil loads	$\delta_{v,soil}$	----	0,000	0,000	0,000
Vertical deformation from traffic loads	$\delta_{v,traffic}$	----	-0,008	0,000	-0,008
Total vertical deformation	$\Delta v$	mm	-21,4	-21,6	
Total relative vertical deformation	$\delta_{v,\%tot}$	%	-0,85	-0,86	
Permitted vertical pipe deformation	$\delta_{v,\%max}$	%	±5,0	±5,0	
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,17	0,17	
Results of necessary deformation proofs	----	----	OK!	OK!	



## **STABILITY / BUCKLING ANALYSIS (CEN-TR 1295-3)**

<b><u>Verification for soil and traffic loads:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>L.T. (1,lt)</u></b>	<b><u>L.T. (2,st)</u></b>
Vertical soil stress on the pipe	$q_v$	kN/m <sup>2</sup>	91,8	12,4	78,6
Friction angle coefficient	$\chi_{kv}$	---	0,53	0,53	0,53
Reduction factor	$K_v$	---	0,90	0,83	0,90
Critical buckling load	$q_{v,crit}$	kN/m <sup>2</sup>	1 944,6	1 269,5	1944,6
Resulting coefficient of safety	$\eta_{s,l}$	---	21,2	19,9	
Necessary coefficient of safety	$F_{s,l}$	---	2,0	2,0	
Ratio of utilization	R.o.U.	---	0,09	0,10	
Results of necessary stability proofs	---	---	OK!	OK!	

<b><u>Verification for external water pressure:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>L.T. (1,lt)</u></b>	<b><u>L.T. (2,st)</u></b>
Hydrostatic pressure on the pipe invert	$p_{ew}$	kN/m <sup>2</sup>	0,0	0,0	0,0
Sum value of relative vertical deformations	$\delta_{v,tot+pre}$	---	-1,8	-1,9	-1,8
Coefficient for $\kappa_{w1}$ and $\kappa_{w2}$	$k_0$	---	0,94	0,94	0,94
Coefficient for $\kappa_{w2}$	$k_1$	---	0,94	0,94	0,94
Coefficient for $\kappa_{w2}$	$k_3$	---	0,75	0,75	0,75
Coefficient for $\kappa_{w2}$	$k_5$	---	0,87	0,87	0,87
Reduction factor (double wave p.d.)	$\kappa_{w2}$	---	0,77	0,79	0,77
Coefficient for $\kappa_{w1}$	$k_2$	---	0,77	0,77	0,77
Coefficient for $\kappa_{w1}$	$k_4$	---	0,92	0,92	0,92
Reduction factor (local p.d.)	$\kappa_{w1}$	---	0,79	0,82	0,79
Combined reduction factor	$\kappa_w$	---	0,61	0,65	0,61
Snap-through coefficient	$\alpha_D$	---	18,60	20,17	18,60
Critical buckling load	crit $p_{we}$	kN/m <sup>2</sup>	457,2	260,8	457,2
Resulting coefficient of safety	$\eta_{s,l,w}$	---	infinite	infinite	
Necessary coefficient of safety	$F_{s,l}$	---	2,0	2,0	
Ratio of utilization	R.o.U.	---	0,00	0,00	
Results of necessary stability proofs	---	---	OK!	OK!	

<b><u>Verification for simultaneous load cases:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>L.T. (1,lt)</u></b>	<b><u>L.T. (2,st)</u></b>
Resulting total coefficient of safety	$\eta_{s,l,total}$	---	21,2	19,9	
Necessary total coefficient of safety	$F_{s,l}$	---	2,0	2,0	
Ratio of utilization	R.o.U.	---	0,09	0,10	
Results of necessary total stability proofs	---	---	OK!	OK!	

## **UPLIFT / BUOYANCY ("+" = downwards & "-" = upwards)**

<b><u>Profile buoyancy:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Profile weight (area weight)	$G_{profile}$	kN/m <sup>2</sup>	0,82
Profile uplift (area force)	$F_{profile}$	kN/m <sup>2</sup>	-0,39
Profiles sufficiency for uplift	---	---	OK!

<b><u>Verification for uplift:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Uplift force	$F_{uplift}$	kN	-18,6
Water filling	$G_{w,filling}$	kN	17,5
Pipe selfweight	$G_{pipe}$	kN	6,5
Backfilling	$G_{backfilling}$	kN	37,6
Total sum of loads	$F_{tot}$	kN	42,9
Minimum required backfilling height	$h_{min}$	m	0,000
Results of total uplift proofs	---	---	OK!

## SIMPLIFIED FATIGUE DESIGN (CEN-TR 1295-3)

<u>Moments and normal forces:</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>M</u>	<u>N</u>
Traffic & bedding reaction at pipe crown	M & N	[kNm,kN]/m	1,3	-36,5
Traffic & bedding reaction at pipe haunch	M & N	[kNm,kN]/m	0,7	-49,5
Traffic & bedding reaction at pipe invert	M & N	[kNm,kN]/m	1,3	-42,5
<u>Fatigue stresses: (outer / inner fiber)</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>outer f.</u>	<u>inner f.</u>
Stress at the pipe crown	$\sigma_{\text{crown}}$	N/mm <sup>2</sup>	-6,0	4,2
Stress at the pipe haunch	$\sigma_{\text{haunch}}$	N/mm <sup>2</sup>	-4,0	1,5
Stress at the pipe invert	$\sigma_{\text{invert}}$	N/mm <sup>2</sup>	-6,3	4,2
<u>Stress range verification:</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>outer f.</u>	<u>inner f.</u>
Fatigue tensile strength (2mil. cycles)	$2\sigma_A$	N/mm <sup>2</sup>	90,5	
Resulting coefficient of safety	$\eta_{S,F}$	----	14,4	21,4
Necessary coefficient of safety	$F_{S,F}$	----	2,0	2,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,14	0,09
Results of necessary stress proofs	----	----	OK!	OK!

## ADVANCED FATIGUE DESIGN (CEN-TR 1295-3)

<u>Moments and normal forces:</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>M</u>	<u>N</u>
Traffic & bedding reaction at pipe crown	M & N	[kNm,kN]/m	1,0	-29,1
Traffic & bedding reaction at pipe haunch	M & N	[kNm,kN]/m	0,5	-39,4
Traffic & bedding reaction at pipe invert	M & N	[kNm,kN]/m	1,1	-33,8
<u>Fatigue stresses: (outer / inner fiber)</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>outer f.</u>	<u>inner f.</u>
Stress at the pipe crown	$\sigma_{\text{crown}}$	N/mm <sup>2</sup>	-4,8	3,3
Stress at the pipe haunch	$\sigma_{\text{haunch}}$	N/mm <sup>2</sup>	-3,2	1,2
Stress at the pipe invert	$\sigma_{\text{invert}}$	N/mm <sup>2</sup>	-5,0	3,4
<u>Stress range verification:</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>outer f.</u>	<u>inner f.</u>
Traffic class (according to FTIA-NCCI1)	TC	----	1	
Load cycles of traffic class for 100 years	$N_{100\text{-years}}$	----	200 000 000	
Fatigue tensile strength (with N cycles)	$\sigma_{\text{fat},N}$	N/mm <sup>2</sup>	49,0	
Resulting coefficient of safety	$\eta_{S,F}$	----	9,8	14,5
Necessary coefficient of safety	$F_{S,F}$	----	1,0	1,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,10	0,07
Results of necessary stress proofs	----	----	OK!	OK!

## **SUMMARY OF DESIGN RESULTS** (CEN-TR 1295-3)

<b><u>Stress verification:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	----	----
Results of necessary stress proofs	----	----
<b><u>Elongation verification:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,21	0,28
Results of necessary elongation proofs	OK!	OK!
<b><u>Deformation verification:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,17	0,17
Results of necessary deformation proofs	OK!	OK!
<b><u>Buckling for soil and traffic loads:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,09	0,10
Results of necessary stability proofs	OK!	OK!
<b><u>Buckling for external water pressure:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,00	0,00
Results of necessary stability proofs	OK!	OK!
<b><u>Buckling for simultaneous load cases:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,09	0,10
Results of necessary stability proofs	OK!	OK!
<b><u>Simplified fatigue stress verification:</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Ratio of utilization	0,14	
Results of necessary stress range proofs	OK!	
<b><u>Advanced fatigue stress verification:</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Ratio of utilization	0,10	
Results of necessary stress range proofs	OK!	
<b><u>Verification for uplift:</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Results of necessary uplift proofs	OK!	

Current pipe design meets all the necessary requirements! OK!



## PIPE DATA (ATV-127)

<b><u>Pipe properties:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
External diameter	$d_e$	mm	2555
Internal diameter	$d_i$	mm	2477
Mean diameter	$d_m$	mm	2516
Mean radius	$r_m$	mm	1258
Unit weight of pipe material	$\chi_P$	kN/m <sup>3</sup>	21,0
<b><u>Material properties:</u></b>			
Stiffness calculation method: <b>S / E ?</b>	----	----	<b>S</b>
Nominal stiffness (Short.t.)	$SN_S$	N/m <sup>2</sup>	5000
Nominal stiffness (Long.t.)	$SN_L$	N/m <sup>2</sup>	2500
Modulus of elasticity (Short.t.)	$E_{PK}$	N/mm <sup>2</sup>	----
Modulus of elasticity (Long.t.)	$E_{PL}$	N/mm <sup>2</sup>	----
Relative failure strain (Short.t.)	$\Delta d_{frac}/d_m$	%	20
Relative failure strain (Long.t.)	$\Delta d_{frac}/d_m$	%	12
Bending tensile strenght (Short.t.)	$\sigma_{PK}$	N/mm <sup>2</sup>	----
Bending tensile strenght (Long.t.)	$\sigma_{PL}$	N/mm <sup>2</sup>	----
<b><u>Cross-section properties:</u></b>			
Wall thickness	$s$	mm	39
Hollow section: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>N</b>
Flange width (outer)	$t_{f,outer}$	mm	----
Flange width (inner)	$t_{f,inner}$	mm	----
Web width	$t_w$	mm	----
Web spacing	$s_w$	mm	----
Elastic neutral axis from inner surface	E.N.A.	mm	19,5
Cross-section area	$A$	mm <sup>2</sup> /mm	39,0
Moment of resistance (outer)	$W_{outer}$	mm <sup>3</sup> /mm	254
Moment of resistance (inner)	$W_{inner}$	mm <sup>3</sup> /mm	254
Moment of inertia	$I$	mm <sup>4</sup> /mm	4 943
<b><u>Safety factors and design limits:</u></b>			
Safety against failure due to fracture	$\gamma_{Frac.}$	----	2,0
Safety against failure due to instability	$\gamma_{Ins.}$	----	2,0
Safety against failure due to fatigue (simp.)	$\gamma_{Fat.1}$	----	2,0
Safety against failure due to fatigue (adv.)	$\gamma_{Fat.2}$	----	1,0
Limit of vertical pipe deformation	$\delta_{v,max}$	%	±5,0
Preliminary deformation	$\delta_{v,pre}$	%	±1,0

## **SOIL DATA (ATV-127)**

### **Trench data:**

	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Covering height	h	m	0,700
Embankment angle	$\beta$	°	45
Trench width at pipe invert	$b_{invert}$	m	5,710
Trench width at pipe crown	b	m	10,820
Covering condition	A	----	1
Embankment condition	B	----	1
Bedding angle	$2\alpha$	°	120
Relative projection	a	----	1,00

### **Covering soil / Backfilling E1:**

	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Soil group	G	----	M
Unit weight of soil material	$\chi_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for soil creep	$f_1$	----	1,00
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Deformation modulus	$E_1$	N/mm <sup>2</sup>	48,6

### **Pipeline zone filling E2:**

	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Soil group	G	----	M
Unit weight of soil material	$\chi_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for soil creep	$f_1$	----	1,00
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Deformation modulus (basic value)	$E_{20}$	N/mm <sup>2</sup>	48,6
Reduction factor for $E_{20}$ with groundwater	$f_2$	----	1,000
Reduction factor for narrow trench	$\alpha_B$	----	1,000
Deformation modulus	$E_2$	N/mm <sup>2</sup>	48,6

### **Surrounding soil next to the pipe E3:**

	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Soil group	G	----	M
Unit weight of soil material	$\chi_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for soil creep	$f_1$	----	1,00
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Deformation modulus	$E_3$	N/mm <sup>2</sup>	48,6

### **Surrounding soil under the pipe E4:**

	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Calculation method $E_4 = 10 * E_1$ : <u>Yes</u> / <u>No</u> ?	----	----	N
Soil group	G	----	M
Unit weight of soil material	$\chi_s$	kN/m <sup>3</sup>	21
Internal friction angle	$\varphi'$	°	38
Reduction factor for soil creep	$f_1$	----	1,00
Compactness (Proctor)	$D_{Pr}$	%	95
Deformation modulus	$E_4$	N/mm <sup>2</sup>	48,6

## **LOAD DATA (ATV-127)**

<b><u>Silo theory:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Application of silo theory: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>Y</b>
Trench walls retained long-term: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>Y</b>
Earth pressure ratio	$K_1$	----	0,500
Wall friction angle	$\delta$	----	25,333
Silo theory reduction factor (basic)	$\kappa$	----	0,985
Silo theory reduction factor (sloped)	$\kappa_\beta$	----	0,992
Silo theory reduction f. (basic, area load)	$\kappa_o$	----	0,970
Silo theory reduction f. (sloped, area load)	$\kappa_{o\beta}$	----	0,985
<b><u>Earth load:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Soil stress due to earth load	$p_E$	kN/m <sup>2</sup>	14,6
<b><u>Water load:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Water level above pipe invert (outer side)	$h_w$	m	1,000
Unit weight of water	$\chi_w$	kN/m <sup>3</sup>	10,0
Water filling in M&N-values: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>Y</b>
*water filling only as amplifying effect ?	----	----	<b>Y</b>
Water filling in stability calc.: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>Y</b>
Water filling in uplift calc.: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>Y</b>
<b><u>Additional rules for traffic loads:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Application of dynamic reductions: <b>Yes / No?</b>	----	----	<b>Y</b>
Reduction of dynamic amplification factor	$r_d$	----	1,00
<b><u>Traffic loads (basic design):</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Boussinesq stress due to LM1 axle load	$p_{LM1,axle}$	kN/m <sup>2</sup>	146,8
Boussinesq stress due to LM1 UD-load	$p_{LM1,UDL}$	kN/m <sup>2</sup>	9,0
Boussinesq stress due to LM2 axle load	$p_{LM2,axle}$	kN/m <sup>2</sup>	162,7
Boussinesq stress due to LM3 UD-load	$p_{LM3,UDL}$	kN/m <sup>2</sup>	45,0
Additional impact coefficient (axle loads)	$\varphi$	----	1,000
Correction factor for axle load spread	$a_f$	----	0,532
Resulting soil stress due to LM1	$p_{V,LM1}$	kN/m <sup>2</sup>	86,9
Resulting soil stress due to LM2	$p_{V,LM2}$	kN/m <sup>2</sup>	86,5
Resulting soil stress due to LM3	$p_{V,LM3}$	kN/m <sup>2</sup>	44,3
Maximum soil stress due to traffic loads	$p_V$	kN/m <sup>2</sup>	86,9
<b><u>Traffic loads (changes for fatigue design):</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Pavement with load distribution: <b>Yes / No ?</b>	----	----	<b>N</b>
Addition to basic covering height	$\Delta h_{fatigue}$	m	0,000
Covering height for fatigue design	$h_{fatigue}$	m	0,700
Boussinesq stress due to LM1 axle load	$p_{LM1,axle, fat}$	kN/m <sup>2</sup>	146,8
Boussinesq stress due to LM2 axle load	$p_{LM2,axle, fat}$	kN/m <sup>2</sup>	162,7
<b>Both / Simplified / Advanced / None ?</b>	----	----	<b>B</b>
<b><u>Load for simplified fatigue verification :</u></b>			
* basic fatigue traffic load (LM1...LM3)	$p_{V,fat}$	kN/m <sup>2</sup>	86,9
* fatigue traffic load reduction factor	$\alpha_V$	----	0,50
* design fatigue traffic load	dyn $p_V$	kN/m <sup>2</sup>	43,4
<b><u>Load for advanced fatigue verification :</u></b>			
* fatigue soil stress due to LM2	$p_{V,LM2,fat}$	kN/m <sup>2</sup>	86,5
* LM2 conversion factor to FLM4	$\beta_V$	----	0,40
* design fatigue traffic load	dyn $p_V$	kN/m <sup>2</sup>	34,6



## **LOAD DISTRIBUTION (between soil and pipe) (ATV-127)**

<b><u>Concentration and stiffness calculations:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Pipe stiffness	$S_0$	N/mm <sup>2</sup>	0,0050	0,0025
Weighted long-term pipe stiffness	$[S_0]$	N/mm <sup>2</sup>	----	0,0046
Modulus of elasticity of pipe material	$E_p$	N/mm <sup>2</sup>	16110	8055
Weighted modulus of elasticity of pipe	$[E_p]$	N/mm <sup>2</sup>	----	14952
Valuation constant	$\Delta f$	----	1,650	1,650
Horizontal embedment stiffness coefficient	$\zeta$	----	1,000	1,000
Horizontal bedding stiffness	$S_{Bh}$	N/mm <sup>2</sup>	29,184	29,184
System stiffness	$V_{RB}$	----	0,0014	0,0013
Ground pressure ratio	$K_2$	----	0,400	0,400
Effective relative projection	$a'$	----	1,000	1,000
Maximum concentration factor	$\lambda_{max}$	----	1,038	1,038
Vertical bedding stiffness	$S_{Bv}$	N/mm <sup>2</sup>	48,640	48,640
Deformation coefficient rule 1	ATV-127 (6.19a)		0,00008	0,00008
Deformation coefficient rule 2	ATV-127 (6.19b)		0,00010	0,00010
Application of correction factors $c^N$ and $c^L$	----	----	No	No
Deformation coefficient (horizontal)	$c_{h,qv}$	----	0,0891	0,0891
Deformation coefficient (horizontal)	$c_{h,qh}$	----	-0,0833	-0,0833
Deformation coefficient (horizontal)	$c_{h,qh^*}$	----	-0,0658	-0,0658
Deformation coefficient (vertical)	$c_{v,qv}$	----	-0,0893	-0,0893
Deformation coefficient (vertical)	$c_{v,qh}$	----	0,0833	0,0833
Deformation coefficient (vertical)	$c_{v,qh^*}$	----	0,0640	0,0640
Coefficient for bedding reaction pressure	$K^*$	----	1,326	1,328
Deformation coefficient	$c_v^*$	----	-0,0044	-0,0043
Stiffness ratio	$V_S$	----	0,187	0,178
Modulus for deformation (subgrade mod.)	$K'$	----	0,892	0,891
Concentration factor above pipe (initial)	$\lambda_p$	----	0,895	0,890
Concentration factor above pipe (modified)	$\lambda_{PG}$	----	0,895	0,890
Upper limit of concentration factor	$\lambda_{fu}$	----	3,895	3,895
Lower limit of concentration factor	$\lambda_{fl}$	----	0,900	0,900
Concentration factor above pipe (final)	$\lambda_{PG}$	----	0,900	0,900
Concentration factor adjacent to pipe	$\lambda_S$	----	1,031	1,031

## **STRESS DISTRIBUTION (at pipe circumference) (ATV-127)**

<b><u>Resulting stresses at pipe circumference:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Vertical soil stress on the pipe	$q_v$	kN/m <sup>2</sup>	100,0	100,0
Horizontal soil stress on the pipe	$q_h$	kN/m <sup>2</sup>	16,7	16,7
<b><u>Resulting bedding reaction pressures:</u></b>				
Horizontal bedding reaction pressure (soil)	$q_h^*$	kN/m <sup>2</sup>	111,9	112,1
Horizontal bedding reaction press. (water)	$q_{hw}^*$	kN/m <sup>2</sup>	13,6	13,6

## MOMENTS AND NORMAL FORCES (ATV-127)

<u>PIPE CROWN (TOP):</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>Short.t.</u>	<u>Long.t.</u>
Moment from vertical total load	$M_{qv}$	kNm/m	41,3	41,3
Moment from side pressure (soil)	$M_{qh}$	kNm/m	-6,6	-6,6
Moment from side bedding reaction (soil)	$M_{qh}^*$	kNm/m	-32,1	-32,1
Moment from side bedding reaction (water)	$M_{qhw}^*$	kNm/m	-3,9	-3,9
Moment from dead weight	$M_g$	kNm/m	0,5	0,5
Moment from water filling	$M_w$	kNm/m	3,8	3,8
<b>Total sum of moments</b>	<b><math>\Sigma M</math></b>	<b>kNm/m</b>	<b>3,1</b>	<b>3,1</b>
Normal force from vertical total load	$N_{qv}$	kN/m	3,4	3,4
Normal force from side pressure (soil)	$N_{qh}$	kN/m	-21,1	-21,1
Normal F. from side bedding reaction (soil)	$N_{qh}^*$	kN/m	-81,2	-81,3
Normal F. from side bedding react. (water)	$N_{qhw}^*$	kN/m	-9,9	-9,9
Normal F. from dead weight	$N_g$	kN/m	0,3	0,3
Normal force from water filling	$N_w$	kN/m	9,9	9,9
<b>Total sum of normal forces</b>	<b><math>\Sigma N</math></b>	<b>kN/m</b>	<b>-98,6</b>	<b>-98,8</b>

<u>PIPE HAUNCH (SPRINGLINE):</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>Short.t.</u>	<u>Long.t.</u>
Moment from vertical total load	$M_{qv}$	kNm/m	-41,9	-41,9
Moment from side pressure (soil)	$M_{qh}$	kNm/m	6,6	6,6
Moment from side bedding reaction (soil)	$M_{qh}^*$	kNm/m	36,8	36,9
Moment from side bedding reaction (water)	$M_{qhw}^*$	kNm/m	4,5	4,5
Moment from dead weight	$M_g$	kNm/m	-0,6	-0,6
Moment from water filling	$M_w$	kNm/m	-4,4	-4,4
<b>Total sum of moments</b>	<b><math>\Sigma M</math></b>	<b>kNm/m</b>	<b>1,0</b>	<b>1,1</b>
Normal force from vertical total load	$N_{qv}$	kN/m	-125,8	-125,8
Normal force from side pressure (soil)	$N_{qh}$	kN/m	0,0	0,0
Normal F. from side bedding reaction (soil)	$N_{qh}^*$	kN/m	0,0	0,0
Normal F. from side bedding react. (water)	$N_{qhw}^*$	kN/m	0,0	0,0
Normal F. from dead weight	$N_g$	kN/m	-1,6	-1,6
Normal force from water filling	$N_w$	kN/m	3,4	3,4
<b>Total sum of normal forces</b>	<b><math>\Sigma N</math></b>	<b>kN/m</b>	<b>-127,4</b>	<b>-127,4</b>

<u>PIPE INVERT (BOTTOM):</u>	<u>Qty</u>	<u>Unit</u>	<u>Short.t.</u>	<u>Long.t.</u>
Moment from vertical total load	$M_{qv}$	kNm/m	43,5	43,5
Moment from side pressure (soil)	$M_{qh}$	kNm/m	-6,6	-6,6
Moment from side bedding reaction (soil)	$M_{qh}^*$	kNm/m	-32,1	-32,1
Moment from side bedding reaction (water)	$M_{qhw}^*$	kNm/m	-3,9	-3,9
Moment from dead weight	$M_g$	kNm/m	0,7	0,7
Moment from water filling	$M_w$	kNm/m	5,2	5,2
<b>Total sum of moments</b>	<b><math>\Sigma M</math></b>	<b>kNm/m</b>	<b>6,8</b>	<b>6,8</b>
Normal force from vertical total load	$N_{qv}$	kN/m	-3,4	-3,4
Normal force from side pressure (soil)	$N_{qh}$	kN/m	-21,1	-21,1
Normal F. from side bedding reaction (soil)	$N_{qh}^*$	kN/m	-81,2	-81,3
Normal F. from side bedding react. (water)	$N_{qhw}^*$	kN/m	-9,9	-9,9
Normal F. from dead weight	$N_g$	kN/m	-0,3	-0,3
Normal force from water filling	$N_w$	kN/m	21,8	21,8
<b>Total sum of normal forces</b>	<b><math>\Sigma N</math></b>	<b>kN/m</b>	<b>-106,0</b>	<b>-106,1</b>

## **STRESSES, ELONGATIONS AND DEFORMATIONS (ATV-127)**

<b><u>Curvature correction for pipe profile</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Curvature correction for outer edge fiber	$\alpha_{ke}$	----	0,990	
Curvature correction for inner edge fiber	$\alpha_{ki}$	----	1,010	
<b><u>Stress verification:</u></b>				
	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Stress at the pipe crown (outer fiber)	$\sigma_{crown,e}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Stress at the pipe crown (inner fiber)	$\sigma_{crown,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Stress at the pipe haunch (outer fiber)	$\sigma_{haunch,e}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Stress at the pipe haunch (inner fiber)	$\sigma_{haunch,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Stress at the pipe invert (outer fiber)	$\sigma_{invert,e}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Stress at the pipe invert (inner fiber)	$\sigma_{invert,i}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Bending tensile strenght (weighted)	$\sigma_{P,[]}$	N/mm <sup>2</sup>	----	----
Resulting coefficient of safety	$\chi_{\sigma,min}$	----	----	----
Necessary coefficient of safety	$\chi_{nec}$	----	----	----
Ratio of utilization	R.o.U.	----	----	----
Results of necessary stress proofs	----	----	----	----
<b><u>Elongation verification:</u></b>				
	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Elongation at the pipe crown (outer fiber)	$\epsilon_{crown,e}$	%	-0,09	-0,10
Elongation at the pipe crown (inner fiber)	$\epsilon_{crown,i}$	%	0,06	0,07
Elongation at the pipe haunch (outer fiber)	$\epsilon_{haunch,e}$	%	-0,05	-0,05
Elongation at the pipe haunch (inner fiber)	$\epsilon_{haunch,i}$	%	0,01	0,01
Elongation at the pipe invert (outer fiber)	$\epsilon_{invert,e}$	%	-0,18	-0,19
Elongation at the pipe invert (inner fiber)	$\epsilon_{invert,i}$	%	0,15	0,16
Ultimate elongation limit (weighted)	$\epsilon_{P,[]}$	%	1,33	1,25
Resulting coefficient of safety	$\chi_{\epsilon,min}$	----	7,3	6,4
Necessary coefficient of safety	$\chi_{nec}$	----	2,0	2,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,27	0,31
Results of necessary elongation proofs	----	----	OK!	OK!
<b><u>Deformation verification:</u></b>				
	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Total change of horizontal diameter	$\Delta d_h$	mm	9,6	9,7
Total change of vertical diameter	$\Delta d_v$	mm	-23,6	-24,7
*Vertical change from soil loads only	$\Delta d_{v,soil}$	mm	0,5	0,5
*Vertical change from traffic loads only	$\Delta d_{v,traffic}$	mm	-24,1	-25,2
Total relative vertical deformation	$\delta_{v,tot}$	%	-0,9	-1,0
Permitted vertical pipe deformation	$\delta_{v,max}$	%	±5,0	±5,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,19	0,20
Results of necessary deformation proofs	----	----	OK!	OK!



## **STABILITY / BUCKLING ANALYSIS (ATV-127)**

<b><u>Verification for soil and traffic loads:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Vertical soil stress on the pipe	$q_v$	$\text{kN/m}^2$	100,0	100,0
Friction angle coefficient	x	----	0,53	0,53
Reduction factor	$K_{v2}$	----	0,90	0,90
Critical buckling load	crit $q_v$	$\text{kN/m}^2$	1 944,8	1 873,6
Resulting coefficient of safety	$\chi_b$	----	19,4	18,7
Necessary coefficient of safety	$\chi_{nec}$	----	2,0	2,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,10	0,11
Results of necessary stability proofs	----	----	OK!	OK!
<b><u>Verification for external water pressure:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Hydrostatic pressure on the pipe invert	$p_{ew}$	$\text{kN/m}^2$	0,0	0,0
Sum value of relative vertical deformations	$\delta_{v,tot+pre}$	----	-1,9	-2,0
Coefficient for $\kappa_{a2}$	$k_0$	----	0,95	0,95
Coefficient for $\kappa_{a2}$	$k_2$	----	0,76	0,75
Coefficient for $\kappa_{a2}$	$k_4$	----	0,89	0,89
Reduction factor (double wave p.d.)	$\kappa_{a2}$	----	0,77	0,77
Coefficient for $\kappa_{a1}$	$k_0$	----	0,94	0,93
Coefficient for $\kappa_{a1}$	$k_2$	----	0,78	0,77
Coefficient for $\kappa_{a1}$	$k_4$	----	0,69	0,68
Reduction factor (local p.d.)	$\kappa_{a1}$	----	0,73	0,72
Combined reduction factor	$\kappa_a$	----	0,56	0,56
Snap-through coefficient	$\alpha_D$	----	18,60	18,77
Critical buckling load	crit $p_{we}$	$\text{kN/m}^2$	420,2	389,5
Resulting coefficient of safety	$\chi_{b,we}$	----	infinite	infinite
Necessary coefficient of safety	$\chi_{nec}$	----	2,0	2,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,00	0,00
Results of necessary stability proofs	----	----	OK!	OK!
<b><u>Verification for simultaneous load cases:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Resulting total coefficient of safety	$\chi_{b,total}$	----	19,4	18,7
Necessary total coefficient of safety	$\chi_{nec}$	----	2,0	2,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,10	0,11
Results of necessary total stability proofs	----	----	OK!	OK!

## **UPLIFT / BUOYANCY** ( "+" = downwards & "-" = upwards )

<b><u>Profile buoyancy:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Profile weight (area weight)	$G_{profile}$	$\text{kN/m}^2$	0,82
Profile uplift (area force)	$F_{profile}$	$\text{kN/m}^2$	-0,39
Profiles sufficiency for uplift	----	----	OK!
<b><u>Verification for uplift:</u></b>	<b><u>Qty</u></b>	<b><u>Unit</u></b>	<b><u>Value</u></b>
Uplift force	$F_{uplift}$	kN	-18,6
Water filling	$G_{w,filling}$	kN	17,5
Pipe selfweight	$G_{pipe}$	kN	6,5
Backfilling	$G_{backfilling}$	kN	37,6
Total sum of loads	$F_{tot}$	kN	42,9
Minimum required backfilling height	$h_{min}$	m	0,000
Results of total uplift proofs	----	----	OK!

## SIMPLIFIED FATIGUE DESIGN (ATV-127)

<b>Moments and normal forces:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>M</b>	<b>N</b>
Traffic & bedding reaction at pipe crown	M & N	[kNm,kN]/m	1,4	-40,4
Traffic & bedding reaction at pipe haunch	M & N	[kNm,kN]/m	0,7	-54,7
Traffic & bedding reaction at pipe invert	M & N	[kNm,kN]/m	2,4	-43,3
<b>Fatigue stresses: (outer / inner fiber)</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>outer f.</b>	<b>inner f.</b>
Stress at the pipe crown	$\sigma_{\text{crown}}$	N/mm <sup>2</sup>	-6,6	4,7
Stress at the pipe haunch	$\sigma_{\text{haunch}}$	N/mm <sup>2</sup>	-4,3	1,6
Stress at the pipe invert	$\sigma_{\text{invert}}$	N/mm <sup>2</sup>	-10,5	8,5
<b>Stress range verification:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>outer f.</b>	<b>inner f.</b>
Fatigue tensile strength (2mil. cycles)	$2\sigma_A$	N/mm <sup>2</sup>	90,5	
Resulting coefficient of safety	$\chi_{\sigma,\text{fat}}$	----	8,6	10,7
Necessary coefficient of safety	$\chi_{\text{nec}}$	----	2,0	2,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,23	0,19
Results of necessary stress proofs	----	----	OK!	OK!

## ADVANCED FATIGUE DESIGN (ATV-127)

<b>Moments and normal forces:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>M</b>	<b>N</b>
Traffic & bedding reaction at pipe crown	M & N	[kNm,kN]/m	1,1	-32,1
Traffic & bedding reaction at pipe haunch	M & N	[kNm,kN]/m	0,6	-43,5
Traffic & bedding reaction at pipe invert	M & N	[kNm,kN]/m	1,9	-34,5
<b>Fatigue stresses: (outer / inner fiber)</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>outer f.</b>	<b>inner f.</b>
Stress at the pipe crown	$\sigma_{\text{crown}}$	N/mm <sup>2</sup>	-5,3	3,7
Stress at the pipe haunch	$\sigma_{\text{haunch}}$	N/mm <sup>2</sup>	-3,4	1,3
Stress at the pipe invert	$\sigma_{\text{invert}}$	N/mm <sup>2</sup>	-8,3	6,7
<b>Stress range verification:</b>	<b>Qty</b>	<b>Unit</b>	<b>outer f.</b>	<b>inner f.</b>
Traffic class (according to FTIA-NCCI1)	TC	----	1	
Load cycles of traffic class for 100 years	$N_{100\text{-years}}$	----	200 000 000	
Fatigue tensile strength (with N cycles)	$\sigma_{\text{fat},N}$	N/mm <sup>2</sup>	49,0	
Resulting coefficient of safety	$\chi_{\sigma,\text{fat}}$	----	5,9	7,3
Necessary coefficient of safety	$\chi_{\text{nec}}$	----	1,0	1,0
Ratio of utilization	R.o.U.	----	0,17	0,14
Results of necessary stress proofs	----	----	OK!	OK!



## **SUMMARY OF DESIGN RESULTS** (ATV-127)

<b><u>Stress verification:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	----	----
Results of necessary stress proofs	----	----
<b><u>Elongation verification:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,27	0,31
Results of necessary elongation proofs	OK!	OK!
<b><u>Deformation verification:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,19	0,20
Results of necessary deformation proofs	OK!	OK!
<b><u>Buckling for soil and traffic loads:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,10	0,11
Results of necessary stability proofs	OK!	OK!
<b><u>Buckling for external water pressure:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,00	0,00
Results of necessary stability proofs	OK!	OK!
<b><u>Buckling for simultaneous load cases:</u></b>	<b><u>Short.t.</u></b>	<b><u>Long.t.</u></b>
Ratio of utilization	0,10	0,11
Results of necessary stability proofs	OK!	OK!
<b><u>Simplified fatigue stress verification:</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Ratio of utilization	0,23	
Results of necessary stress range proofs	OK!	
<b><u>Advanced fatigue stress verification:</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Ratio of utilization	0,17	
Results of necessary stress range proofs	OK!	
<b><u>Verification for uplift:</u></b>	<b><u>Value</u></b>	
Results of necessary uplift proofs	OK!	

Current pipe design meets all the necessary requirements! OK!