Notat

Til: Teknisk regelverk - godkjenningsrådet
Fra: Geir Svanø.
Telefon: 920 18 311
Dato: 2024-08-09
Saksref.: Endringsartikkel #4146
Kopi til:

Plastrør under jarnbanelast - Reknemetode etter Svenskt Vatten P92

Notatet er skrive som vedlegg til ***520 2024 Endringsartikkel 4146***
Kontrollert av Alberto Montafia

Samandrag

Notatet går gjennom grunnlaget for styrkeberekning og berekning av deformasjonar for plastrøyr i jord, med vekt på last frå jarnbane, slik grunnlaget går fram av NS-EN 1295-1:2019 med tilvisingar til ein publikasjon frå Svenskt Vatten.

Notatet viser at alle plastrøyr med ringstivheit SN8 eller større i jarnbanefylling vil ha tilstrekkeleg motstand mot knekking av røyrveggen på grunn av ustabilitet («bukling») og tilstrekkeleg mekanisk styrke under trafikklaster frå tog.

Notatet går ikkje spesifikt inn på leggemetode, men det er forutsett at leggeanvising blir følgd.

(Deformasjon pga toglast blir diskutert i eit anna notat)

Reknemetode

NS-EN 1295-1:2019 «Styrkeberegning av nedgravde rørledninger under forskjellige belastningsforhold» er gjeldande standard for Norge. Standarden er på engelsk og er generell av karakter. Appendix B av standarden viser til «Nationally established methods og design» og for Norge viser appendikset til to rapportar frå det tidlegare Veglaboratoriet, internrapportane 1521 og 1664, som begge omhandlar betongrør.

For plastrør viser appendikset til publikasjonen «VAV P70 Markavloppsror av plast for sjalvfalls-ledningar i jord (Buried gravity sewer plastics pipes). Stockholm 1992.», som dermed er å forstå som metode som gjeld for Norge.

Publikasjonen P70 er ikkje lenger gjeldande og er erstatta av publikasjon P92 «Anvisningar för projektering och utförande av markförlagda självfallsledningar av plast», utgitt av Svenskt Vatten AB, Stockholm 2005.

Bane NOR oppfattar det slik at denne no er gjeldande metode, og denne vil bli brukt til å berekne bereevne av plastrør.

Begrepet ringstivhet

SN [kN/m^2] er ringstivhet for røret. Typisk vil SN 8 bli brukt, dvs ringstivhet 8 kN/m^2.

Ringstivhet blir bestemt i samsvar med NS-EN ISO 9969:2016. Metoden er at eit rør av lengde **L** blir lagt på eit fast underlag og påført ei vertikal last **F** [kN] via ei lastplate som dekker heile lengda av røret. Lasta **F** blir auka til vertikal deformasjon **y** [mm] er 3% av rørdiameteren **d** [mm]. Ringstivhet blir rekna ut med formelen (Denne standarden brukar symbolet S for ringstivhet):

$$S = \left(0{,}0186 + 0{,}025\frac{y}{d}\right)\frac{F}{L\,y}\ x\ 10^6$$

Dersom L og y er gitt i meter blir formelen:

$$S = \left(0{,}0186 + 0{,}025\frac{y}{d}\right)\frac{F}{L\,y}$$

Vi ser at enheten *kN/m²* eigenleg er *kN/m/m* der *kN/m* er linjelast på røret og *m* er defleksjon.

For y/d eksakt lik 3% vil formelen ikkje innehalde diameter *d* :

$$S = \ 0{,}0194\frac{F}{L\,y}$$

Det viser at eit rør med stor diameter og eit rør med liten diameter får same defleksjon for same linjelast last *F/L* [kN/m] når begge rør har same ringstivhet. Men dersom begge rør har same vertikale jordtrykk blir lasta og dermed defleksjonen proporsjonal med rørdiameteren fordi det større røret får større last.

Ringstivhet SN og bøyestivhet EI

P92 gir denne samanhengen mellom ringstivhet SN, bøyestivhet EI og rørdiameter D:

$$SN = \frac{EI}{(1-\nu^2)\,D^3}$$

Dette er bøyestivhet av rørveggen i ringretning, slik at uttrykt med ekvivalent veggtjukne *t* er treghetsmomentet *I* lik

$$I = \frac{t^3}{12}$$

Og har enhet m^4/m dvs per lengdemeter rør. SN får dermed riktig enhet:

$$\frac{{}^{kN}/_{m^2}\ {}^{m^4}/_{m}}{m^3} = \ {}^{kN}/_{m^2}$$

Poissonstalet for PP og PE svarar til nært inkompressibelt, typisk ν = 0,46, som gir:

$$SN = 1{,}26\frac{EI}{D^3}$$

Av dette kan ekvivalent bøyestivhet som svarar til oppgitt ringstivhet utleiast:

$$EI = 0{,}79\ SN * D^3$$

Denne E-modulen svarar til korttidslast med den varighet som lasta har i testen.

E-modul for rør

P92 gir ikkje E-modul for røret ettersom alle nødvendige formlar kan uttrykkast gjennom ringstivhet SN og rørdiameter D. Ein rapport frå Haplast som baserer seg på eit rekneprogam frå KRAH gir følgande, som viser at det er langtidskryp i materialet:

Tilstand (lastvarighet)	Ring-bøyemodul	MPa
3-minutt test	E_{b3}	986
3 månader	E_{b3m}	339
2 år	$E_{b\ 2y}$	276
Langtid (50 år)	$E_{b\ L}$	200

Tabell 1. E-modul som KRAH brukar for sine plastrør

Jarnbanelast

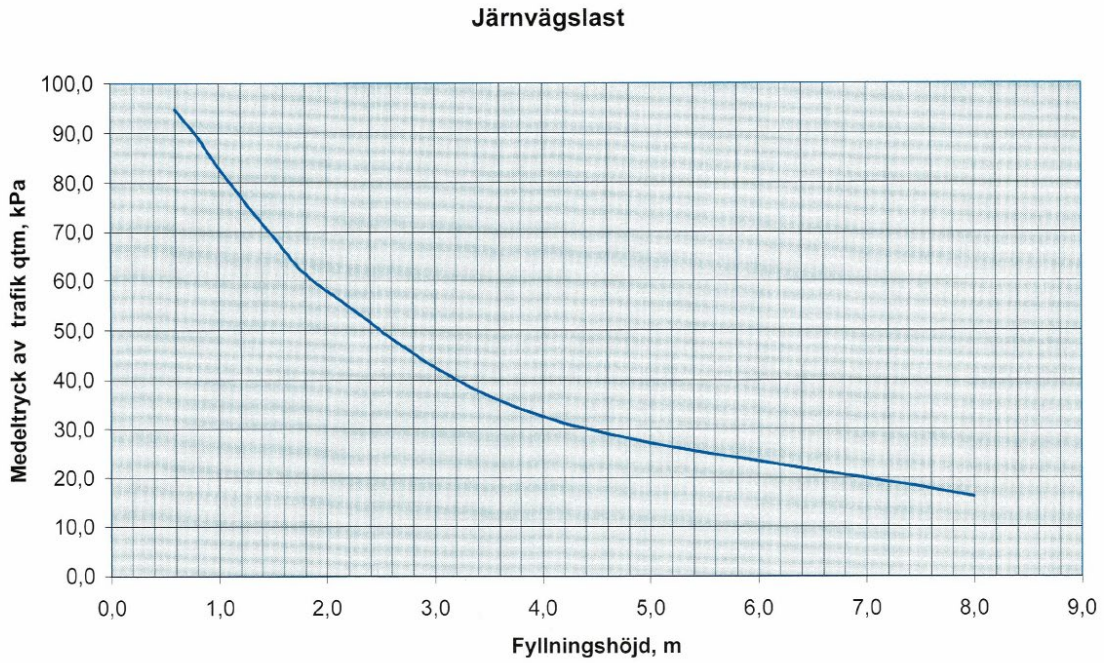
Publikasjon P92 presenterer eit diagram som viser vertikal last mot eit rør som funksjon av fyllingshøgde over røret, på grunn av last frå jarnbane, sjå Figur 1. Lasta som er brukt for diagrammet er linjelast 225 kN/m over 6,4 m lengde direkte over røret og linjelast 120 kN/m på begge sider av denne lasta. Fyllingshøgda i diagrammet bør reknast frå underkant sville.

Dette vil svare til LM71 multiplisert med ein faktor 225*6,4/(4*250) = 1,44

For Østfoldbanen vestre linje med alfafaktor = 1,33 gir dette rom for ein dynamsik støtfaktor lik 1,44/1,33 = 1,08, som er litt lavt. Vi bør ha ein støtfaktor rundt 1,2 sånn at lastverdiar frå diagrammet bør multipliserast med 1,2/1,08 = 1,1 for å dekke Østfoldbanen vestre linje.

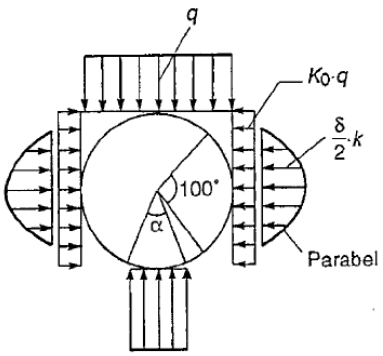
Lasta skal multipliserast med lastfaktor = 1,30 for ULS tilstand.

Last som funksjon av fyllingshøgde kan også utleiast med formlar frå elastisitetsteori, ein formel frå Boussinesq er gitt i P92, og er brukt av Pipelife.



Figur 4.3 Medeltryck på rör i mark orsakat av järnvägslast, BVF 585.12, geoteknisk lastklass 30/10.

Figur 1Vertikaltrykk mot rør som følge av jarnbanelast, frå P92



Figur 5.1 Jordtrycksfördelning runt ett flexibelt rör i mark. Deformationen d i horisontalled kan i detta sammanhang sättas ungefär lika med deformationen i vertikalled. Den horisontella bäddmodulen, k, är en funktion av jordens E-modul och bestämmer tillsammans med deformationen det horisontella jordtryckets storlek. Övriga storheter definieras i texten.

Figur 2Jordtrykksfordeling rundt fleksibelt rør i jord, frå P92

Följande uttryck gäller för rördeformationen baserad på jordtrycksfördelningen i *figur 5.1*:

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_q = q_d \cdot \frac{C \cdot b_1 - 0{,}083 \cdot K_0}{8 \cdot SN_d + 0{,}061 \cdot E'_d} \qquad (5.1)$$

där

q_d = dimensionerande last, kN/m^2

C = lastfaktor

b_1 = koefficient beroende på upplagsvinkeln

b_1 = 0,083 för α = 180°

b_1 = 0,096 för α = 90°

K_0 = jordtryckskoefficient, vald till 0,5 i beräkningsmodellen enl fig 5.1

$SN_d = \left(\frac{EI}{(1-\nu^2) \cdot D^3}\right)_d$ = dimensionerande ringstyvhet för röret, kN/m^2

$E'_d = \frac{E'_k}{\gamma_n \cdot \gamma_m}$ = dimensionerande jordmodul, kN/m^2

Figur 3Formel frå P92 for rørdeformasjon

Deformasjon av røret

P92 gir formelen som er gjengitt i Figur 3 for deformasjon av røret.

Partialkoeffientane γ_n og γ_m er anbefalt lik 1,0 for berekning av deformasjon i bruksgrensetilstand.

Jorda sin E-modul kan reknast som sekantstivhet for deformasjon på grunn av jordlast straks etter legging, og som tangentstivhet for trafikklast.

P92 gir slik anbefaling for tangentstivhet E_{tk} tilbakefylling komprimert til Std Proctor 95%:

E_{tk} = 1200 kN/m^2 + 1100 kN/m^3 * H der H er fyllingshøgde i meter

Og for Std Proctor >98%

E_{tk} = 1400 kN/m^2 + 1300 kN/m^3 * H der H er fyllingshøgde i meter

Sekantstivhet reknast som $E_{sk} = 0{,}65 * E_{tk}$

Faktoren C kan med tilstrekkeleg presisjon setjast til C=1,0 for fleksibelt rør, og med b_1 = 0,083 og K_0=0,5 kan formelen forenklast slik:

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_q = \frac{0{,}083 q_d}{16 * SN_d + 0{,}122 E'_d}$$

Dette er formelen som Pipelife brukar i sine berekningar , sjå:

PIPELIFE: Appendiks R: Belastninger på rør i grøft

P92 gir slike korreksjonar på grunn av installasjonseffektar:

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_M = \left(\frac{\delta}{D}\right)_q + I_f + B_f$$

Der
I_f er installasjonsfaktor, 1% til 2% med komprimering av tilbakefylling

B_f er «bäddfaktor», dvs kvaliteten på grøftebotn (kor jamn den er). 1% til 1,5% for SN 8 med god til normal preparering av grøftebotn, og komprimering av tilbakefylling etter regelverk.

(Variasjonen i I_f og B_f kan vere større for dårlegare tilbakefylling og kontroll, sjå P92 eller PIPELIFE: Appendiks R: Belastninger på rør i grøft)

For langtid multipliserast deformasjonen med 1,5 til 2.

Bukling av røret

Bukling eller knekking er ustabilitet av rørveggen på grunn av ytre trykk. For rør i jord gir P92 denne formelen:

$$q_{Bd} = \frac{\beta}{\gamma_{Rd}} \cdot 5{,}65 \cdot \sqrt{E_t' \cdot SN}$$

Der

q_{Bd} er dimensjonerande kapasitet mot bukling

E_t' er jorda sin tangentmodul.
Tangentmodulen blir brukt fordi instabilitet er ei brå hending.

β er ein reduksjonsfaktor pga ovalitet av røret, gjerne rundt 0,9

γ_{Rd} = 1,5 er sikkerhetsfaktor

Vi ser at rørdiameter ikkje inngår i formelen, fordi for rør med same ringstivhet SN er rørveggen sin bøyestivhet er større for større rørdiameter:

$$EI = 0{,}79\ SN * D^3$$

Knusing av rørveggen

Opptredande tangentialspenning (hoop stress) i rørveggen er

$$\sigma_t = \frac{q_d}{2}\frac{D_y}{t}$$

D_y er ytre diameter, t er veggtykkelse, q_d er dimensjonerande vertikalt overlagringstrykk.

Trykkstyrken av røret er ifølge eit berekningsnotat frå Haplast større enn 10 MPa

Med sikkerhetsfaktor = 1,5 kan $\sigma_t \leq \frac{10}{1{,}5} = 6{,}66$ MPa

Haplast sine tal er: Dy = 2048 mm , t =88,1 mm, som gir at for dette røret svarar tangetialspenning 6,66 MPa til eit vertikalt overlagringstrykk lik:

$$q_d = 2\,\sigma_t \frac{t}{D_y} = 2 * 6{,}66 * \frac{88{,}1}{2048} = 0{,}573\ MPa = 573\ kPa$$

Det svarar til 573/20 = 28 meter fyllingshøgde, *og vil aldri opptre.*

Fordi

$$SN = \frac{EI}{(1-\nu^2)\,D^3} = \frac{E\left(\frac{t^3}{12}\right)}{(1-\nu^2)\,D^3} = \frac{E}{12\,(1-\nu^2)}\left(\frac{t}{D}\right)^3$$

ser vi at alle rør med samme ringstivhet SN også har samme t/D-forhold når dei har samme E-modul. E-modulen kan variere noko, men marginen mot knusing er stor.

Konklusjonen om at knusing av rørveggen ikkje vil opptre gjeld derfor alle rørdiametrar for SN 8 og større.

Maksimalt vertikalt overlagringstrykk på grunn av fare for bukling.

Antar lav E-modul for jorda, som for 1,0 m overlagring, komprimering til 95% Std Proktor:

E_t = 1200 kN/m^2 + 1100 kN/m^3 * 1,0 m = 2300 kN/m^2

SN 8 -rør:

$$q_{Bd} = \frac{0{,}9}{1{,}5} \cdot\ 5{,}65 \cdot \sqrt{2300 \cdot 8} = 459\ kPa$$

Det svarar til 459/20 = 23 meter overdekning og vil i praksis aldri opptre for eit SN8-rør.

(I følgje Figur 1 svarar gir toglasta eit vertikaltrykk på 83 kPa for 1,0 m overdekning, og sjølv om vi for Østfoldbanen legg til 10% og tar med vekta av 1,0 m jord får vi 83*1,1 + 20 = 103,1 kPa)

Deformasjon av røret

Om vi tar utgangspunkt i Figur 1 så er tilleggstrykket med 2 m overfylling 60 kPa og vekt av fyllmassen er ca 2*20 = 40 kPa, lasta er tilsaman 100 kPa.

Med tilbakefylling til 95% std proktor er tangentmodulen for jorda E_t = 1200 + 2*1100 = 3400 kPa, sekantmodulen Esk = 0,65*3400 = 2200 kPa. Antar variasjon +/- 25 %, dvs lav modul =1650 kPa, høg modul 2760 kPa .

Høgt estimat for relativ deformasjon :

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_{Høg} = \frac{0{,}083 * 100}{16 * 8 + 0{,}122 * 1650} = 2{,}5\ \%$$

Lavt estimat for relativ deformasjon :

$$\left(\frac{\delta}{D}\right)_{Lav} = \frac{0{,}083 * 100}{16 * 8 + 0{,}122 * 2760} = \ 1{,}8\ \%$$

+/-25% variasjon i E-modul for jorda gir +/- 17% i variasjon i deformasjon.