

## R: Belastninger på rør i grøft

Fleksible rør som ligger i jord deformeres i takt med massene rundt. Hvor mye røret blir deformert avhenger av rørets styrke (ringstivhet), kvaliteten på massene og jordtrykket. Jordtrykket er igjen avhengig av overdekningen, jordens egenvekt og belastninger fra trafikk og andre laster.

Det finnes flere metoder for å beregne deformasjon av fleksible rør i jord. De vi kjenner til bygger på samme grunnlag, Spanglers modeller. I Norge har vi ofte brukt «den skandinaviske metoden» utarbeidet av Lars-Eric Janson og Jan Molin for flere tiår siden. Den har vist seg å gi gode, konservative resultater – altså er den trygg å bruke. Denne tar utgangspunkt i rør i fylling – at røret legges og så fylles terrenget opp til ønsket nivå. For et rør i en ganske smal grøft med grove masser i gjenfyllingssonen vil det oppstå en hvelvirkning som avlaster det fleksible røret – og deformasjonen blir mindre. Dette er også en grunn til at det er smart å fylle opp og komprimere med tungt utstyr først, og så grave grøfta og legge rør til slutt.

Vi skal straks se nærmere på den skandinaviske beregningsmetoden. I dag finnes det også muligheter for å kjøre datasimuleringer og finne et svar med mange desimaler. Men her, som ellers, kan det være stor forskjell på teori og praksis: Alt er til syvende og sist avhengig av jobben som blir gjort i grøfta! Her kan sluttresultatet fort både bli mye bedre og mye verre enn det teoretiske beregninger tilsier.

Begrensningene i disse beregningene er ofte av praktisk art. For plastmaterialer er tillatt tøyning i materialet en begrensning, men det skal store deformasjoner til for å nå opp i grenseverdiene. 15 % deformasjon er ikke levetidsbegrensende for plastmaterialer med den kvalitet vi har i rørprodukter i dag. I Norge er grensene for tillatt deformasjon rett etter gjenfylling mellom 5 % og 9 %. Det strengeste kravet er ment for normale grøfter med gode masser i ledningssonen og moderat overdekning – der det skal mye slurv til for at det skal gi store deformasjoner.

Leggeanvisningen er den samme for trykløse rørsystemer som for trykkrørledninger – selv om styrken i trykkrør kan være mange ganger større enn for avløpsrør og kabelrør. Grunnen til dette er at trykkrør utsettes for store materialbelastninger på grunn av det innvendige trykket – og av den grunn bør legges omhyggelig og pent. Erfaringer fra gamle dager, der trykkrør kunne bli lagt skjødesløst, bekrefter dette. Den høye ringstivheten for trykkrør kan utnyttes der belastningene er ekstra store.

Men plastrør behøver ikke alltid legges i singel, pukk eller sand. Stedlige masser kan også brukes. Er de av dårlig kvalitet, så vil det kreve mer av personen i grøfta. Men bruk av stedlige masser, når de er egnet eller kan behandles slik at de blir egnet, har en god miljømessig effekt.

Legger man rør i henhold til leggeanvisningene, så skal resultatet bli bra. Teorien bak er som følger:

### Formel for beregning av deformasjon av fleksible rør i grøft

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,083 \cdot q}{16 \cdot SN + 0,122 \cdot E'_s} [ \ ]$$

- $\delta$ : Deformasjon [mm]
- $D$ : Utvendig diameter [mm]
- $q$ : Belastning fra jord og trafikk (jordtrykk),  $q = q_{\text{jord}} + q_{\text{trafikk}}$  [kN/m<sup>2</sup>]
- $SN$ : Rørets ringstivhet [kN/m<sup>2</sup>]
- $E'_s$ : Jordens sekantmodul [kN/m<sup>2</sup>]

Lavere jordtrykk, høyere ringstivhet og høyere sekantmodul bidrar til redusert deformasjon. Og så opererer den skandinaviske metoden med tillegg avhengig av ulike forhold i grøfta, ringstivhet og tid.

### Belastning fra jord, $q_{\text{jord}}$

Her bruker vi vekten av jordsøylen rett over røret - per meter rør. Er egenvekten av massene ikke kjent, så kan du bruke verdiene 18 kN/m<sup>3</sup> for vanlige jordmasser og 20 kN/m<sup>3</sup> for steinfyllinger. Hvis det er grunnvann over rørledningen, så reduseres egenvekten av jordmassene i grunnvannet i henhold til Arkimedes' lov. Grunnvannet utøver et hydraulisk trykk mot røret, som skal inkluderes i beregningene med hensyn på trykket som kan gi kollaps av rør-ringen. Vi regner for en meter rør,  $L = 1$  m, slik at svaret får enhet kN/m<sup>2</sup>. Vekten av jordsøylen øker lineært med overdekningshøyden.

$$q_{\text{jord}} = \frac{\gamma_{\text{jord}} \cdot H \cdot D}{L} [\text{kN/m}^2]$$

- $\gamma_{\text{jord}}$ : Jordens egenvekt, normalt 18 – 20 kN/m<sup>3</sup>
- $H$ : Overdekning [m]
- $D$ : Rørets utvendige diameter [m]
- $L$ : Rørlengde = 1 m

Jordtrykk fra andre typer mer eller mindre statiske laster, for eksempel bygninger, kan legges til jordlast. Hvis deformasjon av rør skal skje, så må det oppstå en setning. Så hvis bygget beveger seg, så vil det påvirke røret. Tunge bygg overfører krefter. Men står det i ro, så vil røret også være stabilt.

### Belastning fra trafikk, $q_{\text{trafikk}}$

Belastningen fra trafikken er i praksis komplisert å anslå nøyaktig. Vi gjør en forenkling og betrakter trafikklasten som en statisk punktlast. Praksis viser at dette er en fornuftig tilnærming. For «offentlig vei» tar vi utgangspunkt i en dimensjonerende, statisk aksellast på 15 tonn pluss et støtt tillegg på 75 % som overføres via to dekk med kontaktflate 0,6 m x 0,2 m. Det betyr at 130 kN overføres pr hjul – eller som et marktrykk på 1083 kN/m<sup>2</sup>. Så vil marktrykket overføres til et

Jordtrykk som avtar eksponentielt med dybden – kreftene spres i massene. Jordtrykkene på grunn av de to hjulene vil møtes på en viss dybde, men da er jordtrykkene så små at de har liten samlet størrelse i forhold til jordtrykket på grunn av vekten av jordmassene.

Den tunge trafikken vi har på flyplasser, havneterminaler, godsterminaler og jernbanespor krever spesielle beregninger. Her kan løsningen være rør med høyere ringstivhet eller at rør støpes inn eller installeres med avlastningsplate over.

I anleggsperioden kan trafikklastene overstige normale laster mye, samtidig som overdekningen ofte er mindre enn for ferdig vei. For eksempel er det målt støtt tillegg på 3 – 400 % på ujevn anleggsvei. Her kan det være nødvendig å gjøre lastbegrensende eller lastfordelende tiltak. Streng hastighets-begrensning over rør-traseer er et effektivt tiltak.

Trafikklast beregnes slik:

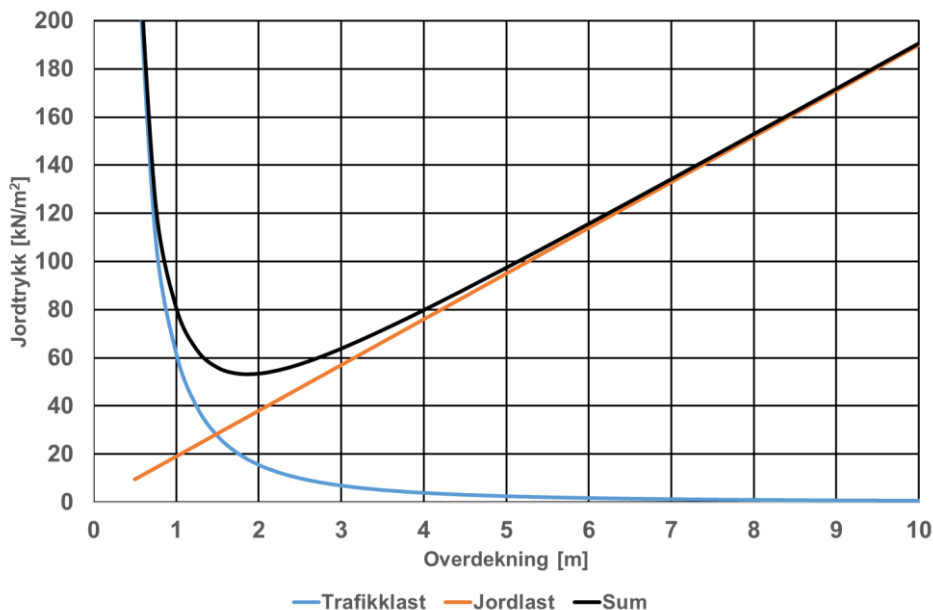
$$q_{\text{trafikk}} = \frac{3 \cdot P}{2\pi \cdot H^2} \quad [\text{kN/m}^2]$$

P: Hjultrykk inklusive dynamisk støtt tillegg [kN]

H: Overdekning [m<sup>2</sup>]

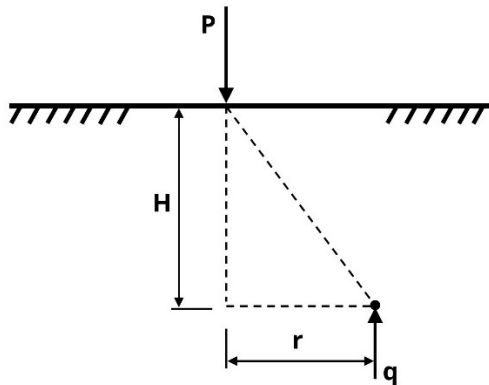
### **Diagram: Belastning fra jord og trafikk**

I diagrammet under har vi satt egenvekten av jord til 19 kN/m<sup>3</sup>. Dimensjonerende hjultrykk er gitt ved en statisk aksellast på 150 kN pluss et støtt tillegg på 75 % - og hjulet har en kontaktflate på 0,6 m · 0,2 m.



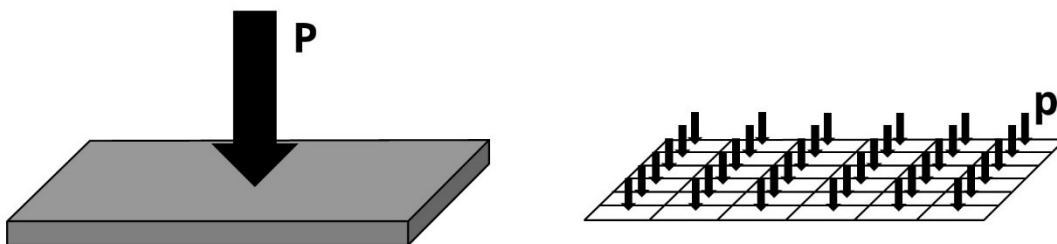
### Jordtrykk fra andre laster på overflaten – Boussinesq formel

Kanskje røret ligger under et søylefundament, ei mobilkran må plassere labben over et rør eller det er snakk om ekstraordinære trafikklaste fra utstyr med store hjul? Da kan vi med hjelp av Boussinesq sin formel finne jordtrykket på røret. Med Boussinesq sin formel kan vi beregne jordtrykket på røret ( $q$ ) fra en punktlast ( $P$ ) med horisontal avstand ( $r$ ) i en vertikal dybde ( $h$ ).



Vertikalt jordtrykk  $q$  i jordmasser - fra en punktlast  $P$

Det er som regel ikke snakk om en punktlast i ordets egentlige betydning, men en last som fordeler seg over ei flate – et marktrykk. Da kan vi dele flaten opp i mange rektangler og finne punktlasten for hvert rektangel. Da blir bildet mer riktig.



Fra en stor punktlast  $P$  på ei flate til mange mindre punktlaster  $p$  over samme areal

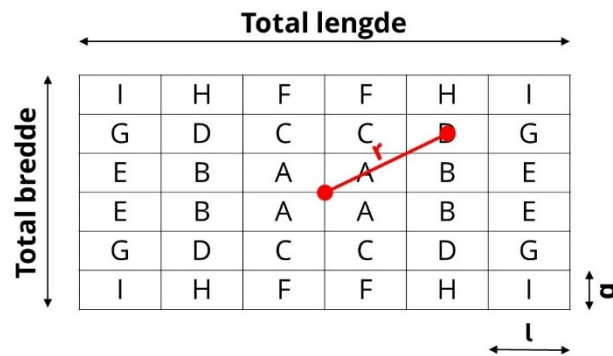
#### Eksempel:

Labben på ei mobilkran overfører 60 tonn, eller 600 kN, via ei plate med lengde 1,2 meter og bredde 1,0 meter – altså et areal på  $1,2 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m} = 1,2 \text{ m}^2$ .

Den jevnt fordelte lasten, marktrykket, blir  $600 \text{ kN}/1,2 \text{ m}^2 = 500 \text{ kN}/\text{m}^2$ .

Vi velger i dette tilfellet å dele flaten inn i et rutenett med seks rektangler i lengde og bredderetning – totalt 36 rektangler. Punktlasten i hvert rektangel ( $p$ ) blir  $600 \text{ kN}/36 = 16,7 \text{ kN}$ . Lengden på hvert rektangel ( $l$ ) blir  $1,2 \text{ m}/6 = 0,2 \text{ m}$  og bredden ( $b$ ) blir  $1,0 \text{ m}/6 = 0,167 \text{ m}$ .

Nå trenger vi å finne avstanden fra senter av flaten til senter av hvert rektangel, r.



Rektangler i illustrasjonen med samme bokstav har samme avstand r fra senter. Lengden fra senter av flaten til senter av rektangel D er 1,5 ganger lengden av ett rektangel – og bredden er 1,5 ganger bredden av ett rektangel. Da blir formelen for D-rektanglene:

$$r_D = \sqrt{(1,5 \cdot l)^2 + (1,5 \cdot b)^2}$$

**Eksempel:**

Rektanglene i forrige eksempel har lengde (l) 0,2 meter og bredde (b) 0,167 meter. Lengden fra senter flate til senter D-rektangler ( $r_D$ ) er

$$r_D = \sqrt{(1,5 \cdot l)^2 + (1,5 \cdot b)^2} = \sqrt{(1,5 \cdot 0,2 \text{ m})^2 + (1,5 \cdot 0,167 \text{ m})^2} = 0,391 \text{ meter}$$

Avstanden r regnes ut for alle rektanglene:

Rektangel	r [m]
A	0,130
B	0,311
C	0,270
D	0,391
E	0,507

Rektangel	r [m]
F	0,429
G	0,559
H	0,514
I	0,651

Ut fra avstandene r beregnes jordtrykkene  $q_{A, B, C, D \text{ osv.}}$  fra hver enkelt punktlast  $p_{A, B, C, D \text{ osv.}}$  ut for aktuell overdekning (h). Boussinesq sin formel for jordtrykk:

$$q_{A,B,C,D \text{ osv.}} = \frac{3p_{a,b,c,d \text{ osv.}}}{2\pi h^2} \frac{1}{[1 + (r/h)^2]^{5/2}}$$

Merk at det i dette tilfellet er fire rektangler med samme avstand til senter av flaten. Husk å multiplisere jordtrykkene med 4. Til slutt summeres alle jordtrykkene og denne summen brukes som jordtrykk mot røret.

**Eksempel:**

Jordtrykket fra ett D-rektangel ( $q_D$ ), fra forrige eksempel, med en punktlast ( $p$ ) på 16,7 kN i en avstand ( $r$ ) 0,391 meter fra senter ved 1,0 meter overdekning ( $h$ ) er

$$q_D = \frac{3p}{2\pi h^2} \frac{1}{[1 + (r/h)^2]^{5/2}} = \frac{3 \cdot 16,7 \text{ kN}}{2 \cdot \pi \cdot (1,0 \text{ m})^2} \frac{1}{[1 + (0,391 \text{ m}/1,0 \text{ m})^2]^{5/2}} = 5,60 \text{ kN/m}^2$$

Jordtrykket ( $q$ ) regnes ut for alle rektanglene:

Rektangel	q per rektangel [kN/m <sup>2</sup> ]
A	7,6
B	6,3
C	6,7
D	5,6
E	4,5

Rektangel	q per rektangel [kN/m <sup>2</sup> ]
F	5,2
G	4,0
H	4,4
I	3,3
Sum	47,7

Summen blir 47,7 kN/m<sup>2</sup> og dette tallet multipliseres med 4, i og med at det er fire rektangler med samme avstand  $r$  til senter, for å finne det totale jordtrykket fra platen kraften virker på – ved 1,0 meter overdekning:

$$q = 4 \cdot 47,7 \text{ kN/m}^2 = 190,8 \text{ kN/m}^2$$

Når vi legger til jordlasten blir det totale jordtrykket litt større enn det du får fra trafikk på en offentlig vei med minimum overdekning 0,6 meter. I og med at forskjellen er marginal, så vil det gå bra. Deformasjonen vil sannsynligvis gå tilbake fordi punktlasten normalt er veldig temporær og jordlasten veldig liten. Det er enkelt å redusere jordtrykket mot røret ved å øke arealet lasten fordeler seg over og dermed redusere marktrykket – legge ei større plate under labben.

### Ringstivhet, SN

Ringstivhet er et tall for rør-ringens styrke. For de fleste trykløse rørsystemer deles rørene inn i klasser etter ringstivhet, for eksempel SN 8. Tallet representerer ringstivheten i kN/m<sup>2</sup>. Tallet for ringstivhet er anvendelig i visse beregninger, for eksempel for å beregne deformasjon av nedgravde rør og evne til å tåle undertrykk.

De oppgitte ringstivhetsverdiene er korttidsverdier. Unntaksvis er det behov for å beregne med langtidsverdier – og må redusere korttidsverdiene i forhold til dette. Dette gjelder for eksempel når vi skal beregne hvor høyt undertrykk røret tåler over lang tid.

Å måle ringstivhet for en rørdel er litt komplisert. Ringstivheten vil øke på grunn av rørdelens geometriske utforming. For rørdeler med konstruert rørvegg er ringstivhet en klassebenevnelse. For rørdeler med glatt, homogen rørvegg er det ikke en klasse. Her bruker vi  $SDR = D/e$  eller  $S = (SDR-1)/2$ .

**Ringstivhet for trykkrør:**

	SDR								
	41	33	26	21	17	13,6	11	9	7,4
<b>PE 100</b>	1,3	2,5	5,3	12	20	42	83	163	318
<b>PVC</b>		8,0		32		120			

*Sammenheng mellom SDR-verdi, rørmateriale og ringstivhet [kN/m<sup>2</sup>] for trykkrør*

***Jordmassenes sekantmodul, E's***

Jordmassenes sekantmodul er et uttrykk for friksjonsjord sin evne til å absorbere krefter. Høy sekantmodul betyr at jordmassene deformeres lite – og massene vil støtte røret godt. Friksjonsjord med høy sekantmodul påvirkes lite av vanninnholdet. Er massene svært dårlige og har høyt vanninnhold, så kan støtteevnen settes til null. Da oppstår det heller en situasjon der det som befinner seg rundt røret overfører et jevnt fordelt hydraulisk trykk mot røret. Leggedybden begrenses i slike tilfeller av rørets evne til å tåle utvendig overtrykk. Ved bruk av stedlige eller kortreiste masser i ledningssonen må egnethet vurderes fra gang til gang.

Jordmassenes sekantmodul øker med komprimeringsgraden og reduseres med vanninnholdet.

**Veiledende verdier for sekantmodul for masser som kan brukes i ledningssonen:**

Jordtype	Komprimering	Sekantmodul [kN/m <sup>2</sup> ]
Finpukk eller singel (4/16, 8/22, 4/22 e.l.) *	Ingen	2000
Finpukk med øvre nominell kornstørrelse mellom 4 og 8 mm *	Lett	2000
	Ingen	1500
Velgradert grus med nedre nominell kornstørrelse 2 mm	Normal	2000
	Lett	1500
	Ingen	1000
Grusholdig sand/grov sand med nedre nominell kornstørrelse 0,2 mm	Normal	1500
	Lett	1000
	Ingen	500
Silt- eller leirholdige grove friksjonsmasser **	Normal	1000
	Lett	500
	Ingen	250
Fin sand og silt **	Normal	500
	Lett	250
Andre «dårlige» masser **		0

\* Best egnet ved fare for frost

\*\* Uegnet ved fare for frost

**Eksempel:**

Hva er beregnet deformasjon for et SN 8 rør lagt i pukk med 8 meter overdekning i en steinfylling?

$$\frac{\delta}{D} = \frac{0,083 \cdot q}{16 \cdot SN + 0,122 \cdot E'_s} = \frac{0,083 \cdot 8 \text{ m} \cdot 20 \text{ kN/m}^3}{16 \cdot 8 \text{ kN/m}^2 + 0,122 \cdot 2000 \text{ kN/m}^2} = 0,036 = 3,6 \%$$

Blir jobben i grøfta gjort godt, så blir det et lite tillegg – og et større tillegg for dårlig utført jobb (se neste avsnitt). Ved normale forhold kan en i denne grøfta forvente deformasjoner mellom 3 til 6 %.



## Tilleggsfaktorer

Den skandinaviske metoden opererer med større eller mindre tillegg for å finne endelig deformasjon.

$$\frac{\delta}{D} = L_f \cdot \left( \frac{0,083 \cdot q}{16 \cdot SN + 0,122 \cdot E'_s} \right) + I_f + G_f$$

- L<sub>f</sub>:** Langtidsfaktor. For å finne endelig deformasjonen, etter at jordmassene har satt seg ferdig, multipliseres selve formelen med en langtidsfaktor. I gode, godt komprimerte jordmasser blir denne faktoren liten. Verdier fra 1,5 til 2,0 er vanlig å bruke.
- I<sub>f</sub>:** Installasjonsfaktor. 1 – 2 % legges til når det for eksempel mangler egen kontroll under legging eller når det foregår tung anleggstrafikk ved liten overdekning eller når det komprimeres med tungt utstyr rett over rørledningen.
- G<sub>f</sub>:** Grøtdefaktor. 1 – 5 % legges til avhengig av om utførelsen er svært god og massene er gode eller dårligere.

Det sier seg selv at beregningen ikke blir særlig nøyaktig. Praksis viser imidlertid at metoden gir en god pekepinn om sluttresultatet blir innenfor krav eller ikke. Det er uansett jobben som blir gjort i grøfta som er det viktigste faktoren.

## Kollaps

Ved faste grunnforhold vil en eventuell kollaps av rør-ringen, på grunn av overbelastning, skje plutselig. Tillatt jordtrykk med tanke på kollaps:

$$q_{\text{tillatt}} = \frac{5,63}{\beta} \sqrt{SN \cdot 2 \cdot E'_s}$$

- β:** Sikkerhetsfaktor, minst 1,5 [ ]
- SN:** Rørets ringstivhet [kN/m<sup>2</sup>]
- E'<sub>s</sub>:** Jordmassenes sekantmodul [kN/m<sup>2</sup>]

### Eksempel:

Hva er maksimum tillatt jordtrykk for et SN 8 rør lagt i pukk?

$$q_{\text{tillatt}} = \frac{5,63}{\beta} \sqrt{SN \cdot 2 \cdot E'_s} = \frac{5,63}{1,5} \sqrt{8,0 \text{ kN/m}^2 \cdot 2 \cdot 2000 \text{ kN/m}^2} = 671 \text{ kN/m}^2$$

671 kN/m<sup>2</sup> tilsvarer jordtrykket for et rør med cirka 35 meter overdekning – med en sikkerhetsfaktor på 1,5. Det er med andre ord ekstremt sjelden vi ser denne typen kollaps for rørtypene vi bruker i Norge.

### Tøyning i rørveggen ved deformasjon

Normalt trenger vi ikke å tenke på tøyninger i materialet på grunn av deformasjon. Men ved tykkvegga rør med svært høy ringstivhet lagt med ekstremt høye overdekninger, så kan tøyningen på grunn av deformasjon bli dimensjonerende. Tillatt tøyning for PVC er 2,5 % og for PE 5 %.

Tøyning i rørveggen for rør med glatt homogen rørvegg regnes ut ved hjelp av følgende formel:

$$\epsilon = D_f \cdot \frac{\delta}{D} \cdot \frac{1}{SDR - 1}$$

D<sub>f</sub>: Tøyningsfaktor, settes til 6 for rør med glatt homogen rørvegg [ ]

$\frac{\delta}{D}$ : Relativ deformasjon [ ]

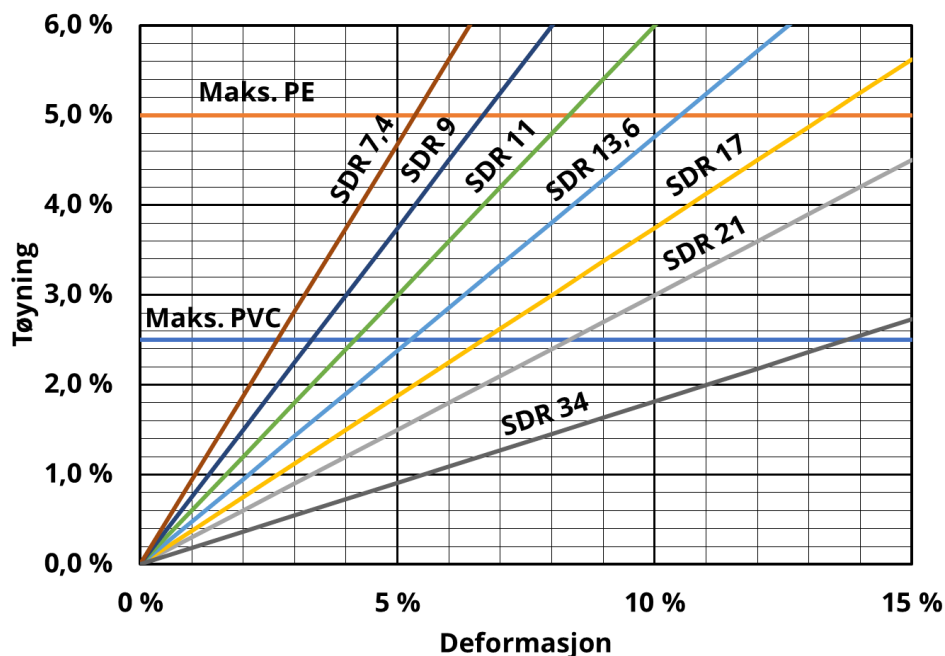
SDR:  $\frac{D}{e}$  [ ]

#### Eksempel:

Hva er tøyningen i rørveggen for et PE SDR 11 rør som deformeres 10 %?

$$\epsilon = D_f \cdot \frac{\delta}{D} \cdot \frac{1}{SDR - 1} = 6 \cdot \frac{10}{100} \cdot \frac{1}{11 - 1} = 0,06 = 6 \%$$

10 % deformasjon gir en tøyning over 5 % for et PE SDR 11 rør.



Tøyning i rørvegg i forhold til deformasjon for rør med glatt homogen rørvegg