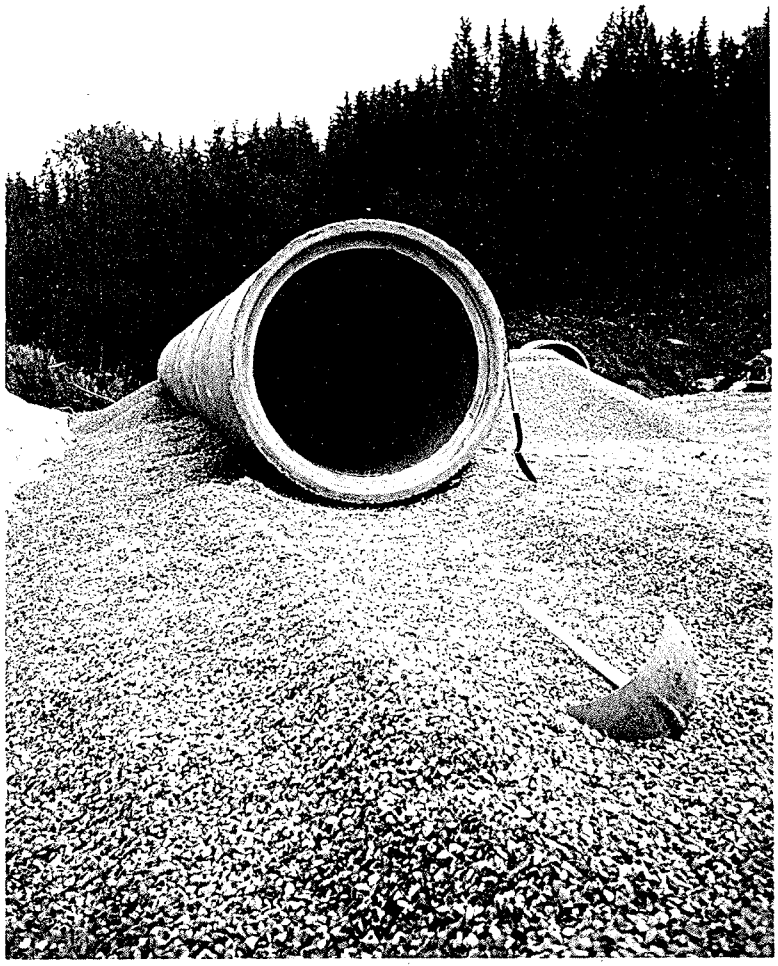
Intern rapport nr. 1554

Jordtrykk på betongrør



Mai 1992

Veglaboratoriet

Intern rapport nr. 1554

Jordtrykk på betongrør

Sammendrag

Det finnes en rekke teorier for beregning av jordtrykk på stive rør. De fleste av beregningsmodellene bygger på Marston/ Spangler's teorier. Betongrør i Norge og Sverige er dimensjonert etter en modifisert Marston/Spangler modell. Jordtrykksteorien til Marston/Spangler har en rekke svakheter ut fra klassisk geoteknisk jordtrykksteori. Det er utviklet en teori for belastning på stive rør. Modellen er basert på Janbu's friksjonstall, som er brukt i beregning av friksjonspeler. Ved å innføre mobiliseringsgraden f og ruheten r, kan jordtrykket på stive rør behandles konsistent med klassisk jordtrykksteori. Beregningsmodellen kan brukes på stive rør i grøft og fylling. Det er utført beregninger på et betongrør i fylling med indre diameter 1,6 m. Resultater fra beregningsmodellen er sammenlignet med resultater fra modifisert Marston/Spangler teori som danner grunnlaget for norsk og svensk standard, og modellen som er brukt i dansk standard. Den foreslåtte beregningsmodell kan også brukes til å beregne jordtrykk på rør med kompressibelt lag. Dette er en metode som brukes for å redusere belastningen på røret.

Emneord: *Betong, rør, jordtrykk, beregning*

Seksjon: 47-Geoteknisk
Saksbehandler: Jan Vaslestad /ABL
Dato: Mai 1992

Statens vegvesen, Vegdirektoratet

Veglaboratoriet
Postboks 6390 Etterstad, 0604 OSLO
Telefon (02) 63 99 00, Telefax (02) 46 74 21

S U M M A R Y

Several theories exist for evaluating the pressure on buried rigid pipes. Most models are based on the Marston/Spangler Theory. This theory has some deficiencies in relation to classical soil mechanics theories. Based on Janbu's friction number for calculating the bearing capacity of friction piles, an alternative theory is developed for rigid pipes. By introducing degree of mobilisation f and roughness number r, the soil pressure on rigid pipes may be treated consistent with classical soill mechanics theories. The model may be used both for rigid pipes in trenches and underneath embankments. Calculations performed for a 1.6 m diameter concrete pipe using this model is compared with results using the modified Marston/Spangler theory. The proposed model may also be used to calculate soil pressures on pipes with a compressible layer above the crown which is a method employed in order to reduce the loads on the pipe.

INNHOLD

	SAMMENDRAG	s. 1
1.	BAKGRUNN	s. 1
2.	BEREGNINGSMETODE FOR JORDTRYKK PÅ STIVE RØR	s. 2
	2.1 GRUNNLAG	"
	2.2 GRØFT	"
	2.3 FYLLING	s. 3
3.	SAMMENLIGNING AV BEREGNINGSMETODER	s. 4
4.	BELASTNINGSREDUKSJON VED BRUK AV KOMPRESSIBELT LAG	s. 5
	REFERANSER	s. 6

Jordtrykk på betongrør

Jan Vaslestad Veglaboratoriet, Oslo

SAMMENDRAG

Det finnes en rekke teorier for beregning av jordtrykk på stive rør. De fleste av beregningsmodellene bygger på Marston/Spangler's teorier. Betongrør i Norge og Sverige er dimensjonert etter en modifisert Marston/Spangler modell. Jordtrykksteorien til Marston/Spangler har en rekke svakheter ut fra klassisk geoteknisk jordtrykksteori. Det er utviklet en teori for belastning på stive rør. Modellen er basert på Janbu's friksjonstall, som er brukt i beregning av friksjonspeler. Ved å innføre mobiliseringsgraden f og ruheten r, kan jordtrykket på stive rør behandles konsistent med klassisk jordtrykksteori.. Beregningsmodellen kan brukes på stive rør i grøft og fylling. Det er utført beregninger på et betongrør i fylling med indre diameter 1,6 m. Resultater fra beregningsmodellen er sammenlignet med resultater fra modifisert Marston/Spangler teori som danner grunnlaget for norsk og svensk standard, og modellen som er brukt i dansk standard. Den foreslåtte beregningsmodell kan også brukes til å beregne jordtrykk på rør med kompressibelt lag. Dette er en metode som brukes for å redusere belastningen på røret.

1. BAKGRUNN

Den mest brukte teorien for beregning av jordtrykk på rør ble utviklet ved Iowa Engineering Experiment Station av Marston/Spangler i perioden 1910-1940. Teorien er oppsummert av Spangler og Handy (1982). Marston/Spangler's teori blir fremdeles brukt i de fleste land i Europa, Japan og USA. De norske standarder for betongrør NS 3027 og NS 3028, er basert på en modifisert Marston/-Spangler teori, Aadnesen (1973). Den svenske normen for beregning av laster på betongrør, Eggwertz (1986), er svært lik den norske. Både den svenske og den norske metoden bygger i hovedtrekk på Janson (1965). Den vertikale belastning Q på et stivt rør kan skrives på formen:

$$Q = C\gamma B^2 \quad [kN/m] \qquad (1)$$

der C = koeffisient
γ = tyngdetetthet av masser [kN/m^3]
B = ytre diameter på røret [m]

I grøft settes B lik grøftens bredde. Koeffisienten C er en funksjon av H/B og Ktanϕ,

der H = fyllingshøyden over topp rør
K = aktiv jordtrykkskoeffisient

$$K = K_A = \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} \qquad (2)$$

ϕ = friksjonsvinkel

Hovedinnvendingene mot Marston/-Spangler's teori er følgende:

- Antagelsen om vertikale skjærflater
- Bruk av $K = K_A$ medfører at det ikke virker skjærkrefter på de vertikale skjærplan. Marston/Spangler's teori er derfor grunnleggende feil i den teoretiske oppbygging. I praktisk bruk blir likevel feilen liten og ifølge Spangler og Handy (1982) er feilen også på den sikre siden.
- Verdier av Ktanϕ er basert på empirikk. Anbefalte verdier er Ktanϕ = 0,11 for bløt leire og Ktanϕ = 0,19 for godt komprimert sand og grus.

  I de norske og svenske betongrørs normene er det brukt følgende verdier:

  $\phi = 31^0$ $K = 1-\sin\phi$
  og Ktanϕ = 0,3.

  Dette er basert på Janson (1965).
- Setninger av rør og omfyllingsmasser blir ivaretatt av en abstrakt empirisk parameter kalt setningsforholdet r_{SD} Grunnlaget for dette setningsforholdet er basert på svært få eksperimentelle data, Krizek et.al. (1971).

- Høyden fra topp av rør til planet for lik setning, H_e, er en annen omdiskutert parameter. H_e blir beregnet på grunnlag av r_{SD}. Flere metoder er foreslått for å beregne H_e, Janson (1965) og Eggwertz (1986) foreslo å bruke en konstant verdi $H_e = 0{,}97B$. Aadnesen (1973) foreslo å bruke $H_e = 0{,}8B$.

2. BEREGNINGSMETODE FOR JORDTRYKK PÅ STIVE RØR

2.1 GRUNNLAG

På bakgrunn av de påviste grunnleggende svakhetene i den mye brukte Marston/-Spangler-teorien, er det utviklet en enkel teori for beregning av jordtrykk på stive rør basert på klassisk jordtrykksteori. To parametre er sentrale i bruk av denne teorien:

- Mobiliseringsgraden $f = \frac{\tan\rho}{\tan\phi}$ (3)

Mobiliseringsgraden f er definert som forholdet mellom mobilisert friksjon $\tan\rho$ i jorda og friksjonen $\tan\phi$. Mobiliseringsgraden f er også den inverse av sikkerhetsfaktoren F:

$$f = 1/F \qquad (4)$$

- Ruheten $r = \frac{\tan\delta}{\tan\rho}$ (5)

Ruheten r er definert som forholdet mellom mobilisert friksjon $\tan\delta$ langs en vegg og mobilisert friksjon $\tan\rho$ i jorda. Geometrien på de kritiske skjærflatene varierer med størrelsen på r, se fig. 1.

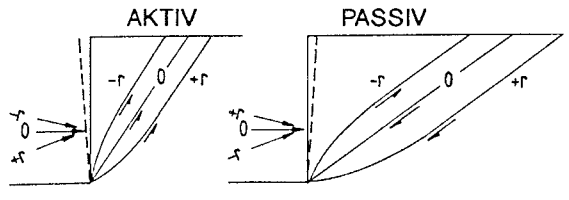


Fig. 1 Ruhetens innvirkning på skjærflatenes geometri, etter Janbu (1975)

I følge Janbu (1957) er det ingen parameter som har større innvirkning på jordtrykket enn ruheten r.

2.2 GRØFT

I en grøftesituasjon vil de tilbakefylte massene sette seg i forhold til in-situ massene, og oppadrettede skjærspenninger τ_v vil opptre, se fig. 2.

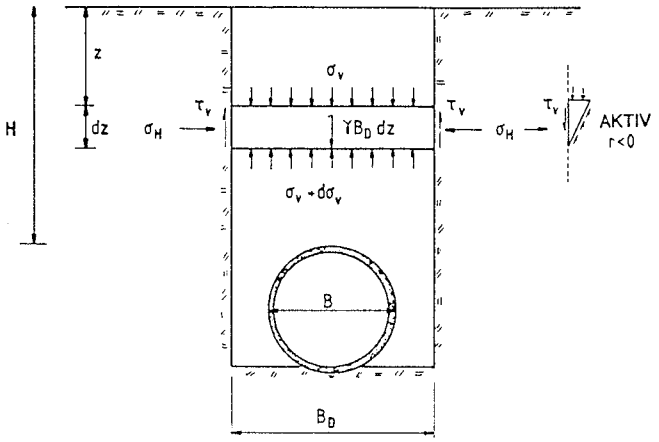


Fig. 2 Likevekt av element over rør i grøft.

Dette tilsvarer aktivt jordtrykk med ruhet $r < 0$.
Plane skjærflater gir en god tilnærmelse for $r < 0$, ifølge Janbu (1957).
Aktiv jordtrykkskoeffisient kan finnes av uttrykket:

$$K_A = \frac{1}{\left[\sqrt{1+\tan^2\rho} + \tan\rho\sqrt{1-|r|}\right]^2} \qquad (6)$$

For å beskrive skjærspenningene τ_v er det hensiktsmessig å innføre friksjontallet:

$$S_v = |r|\tan\rho K_A \qquad (7)$$

K_A er en unik funksjon av ruheten r og mobilisert friksjon $\tan\rho$, og det er også S_v. Skjærspenningene kan nå skrives:

$$\tau_v = S_v(\sigma_v + a) \qquad (8)$$

der σ_v = vertikalt jordtrykk i dybde z
a = attraksjon = $c/\tan\phi$

Friksjonstallet S_v kan finnes av fig. 3.

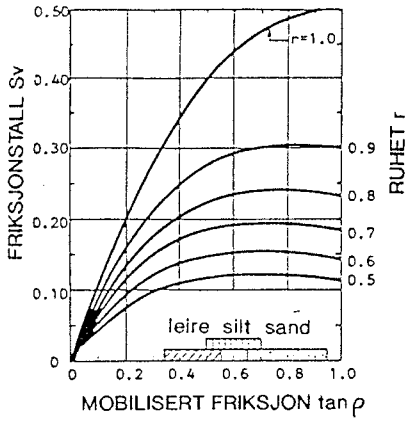


Fig. 3 Friksjonstallet S_v, etter Janbu (1976)

Ved å betrakte likevekten av et element med bredde B_D og tykkelse dz kan følgende differensialligning settes opp:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma - \frac{2S_v}{B_D}(\sigma_v + a) \qquad (9)$$

Ved å sette attraksjonen a = 0, fåes følgende uttrykk for det vertikale jordtrykket (med z = H):

$$\sigma_v = \frac{\gamma B_D}{2S_v}\left[1 - e^{-2S_v\frac{H}{B_D}}\right] \text{ [kN/m}^2\text{]} \qquad (10)$$

For å få ligning (12) på samme formen som i Marston/Spangler's teori, ligning (1), multipliseres med B_D og følgende vertikal last Q_D fåes:

$$Q_D = C_D \gamma B_D^2 \quad \text{[kN/m]} \qquad (11)$$

$$\text{og } C_D = \frac{1 - e^{-2S_v\frac{H}{B_D}}}{2S_v} \qquad (12)$$

Dette uttrykket gjelder for rør i grøft. Rør lagt i fylling behandles i det følgende. En mer detaljert fremstilling finnes i Vaslestad (1990)

2.3 FYLLING

For rør i fylling vil de relative deformasjonene medføre at det opptrer nedadrettede skjærspenninger på røret, se fig. 4.

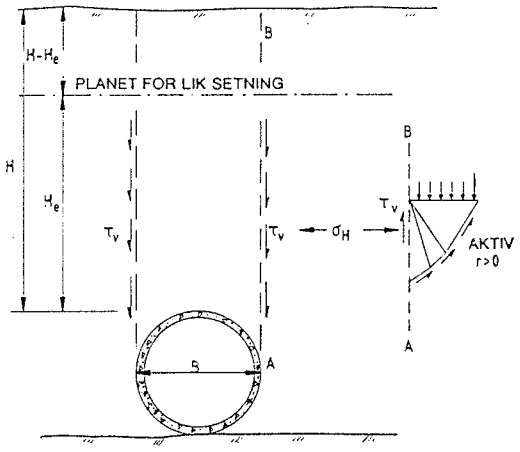


Fig. 4 Rør i fylling.

Røret er stivt i forhold til omliggende masser, og røret "tiltrekker" last. Situasjonen tilsvarer aktivt jordtrykk med ruhet r > 0, se fig 4. Plane skjærflater brukes også her. Det negative friksjonstallet S_{vn} brukes:

$$S_{vn} = r\tan\rho K_A \qquad (13)$$

S_{vn} kan finnes av fig. 5.

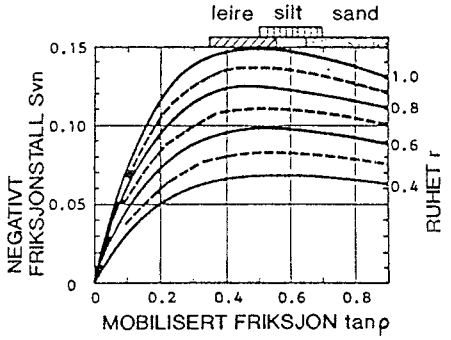


Fig. 5 Det negative friksjonstallet S_{vn}, etter Janbu (1976)

En tilsvarende likevekt som for rør i grøft foretas, og følgende vertikal last fåes.

$$Q_F = C_F \gamma B^2 \quad \text{[kN/m]} \qquad (14)$$

Ved å innføre høyden H_e fra topp rør til det såkalte planet for lik setning, se fig. 4, og sette H_e = 2B etter Leonhardt (1979) fåes:

$$C_F = \frac{e^{2S_{vn}\frac{H}{B}} - 1}{2S_{vn}} \quad \text{når } H \le 2B$$

$$\text{og } C_F = \frac{e^{4S_{vn}} - 1}{2S_{vn}} + \left[\frac{H}{B} - 2\right]e^{4S_{vn}} \quad \text{når } H > 2B$$

For dimensjonering anbefales det å bruke en ruhet r = 0,7 - 0,9.
Økende ruhet gir økende last på røret.

Eksempel
Selig og Packard (1986) brukte element-programmet SPIDA og Marston/Spangler's teori til å beregne vertikal jordlast på et betongrør i fylling med følgende data:

Ytre diameter	B = 1,8 m
Fyllingshøyde	H = 7,6 m
Tyngdetetthet	γ = 20,4 kN/m^3
Friksjonsvinkel	ϕ = 35^o

Røret ble omfylt med velkomprimert grus og fyllingen ble bygd opp av komprimert siltig leire i 30 cm lag. In-situ massene består av siltig leire. Følgende fremgangsmåte brukes for å finne jord-lasten etter den foreslåtte beregnings-metode:

- Med mobiliseringsgrad f = 0,7 fåes mobilisert friksjonsvinkel tanρ = ftanϕ = 0,49.
- Med valgt ruhet r = 0,8 fåes S_{vn} = 0,12 fra fig. 5.
- Med disse verdiene innsatt i formel (14) fåes lasten Q_F = 407 kN/m.

Vertikallasten fra de 3 beregnings-metodene er sammenstilt i tabell 2.

Tabell 1. Beregnet vertikallast på betongrør i fylling.

Beregningsmetode	Vertikallast Q_F [kN/m]
Marston/Spangler	460
SPIDA	396-415
Vaslestad	407

Liedberg (1991) utførte fullskalaforsøk på betongrør med indre diameter 600 mm, og sammenlignet med en rekke beregnings-metoder i tillegg til programmet SPIDA. Elementprogrammet SPIDA ga god overens-stemmelse med de målte jordtrykk.

3. SAMMENLIGNING AV BEREGNINGSMETODER

For å sammenligne de ulike beregnings-metodene, er det tatt utgangspunkt i et rør i fylling med følgende data:

Indre diameter 1,6 m
Ytre diameter B = 1,95 m
Tyngdetetthet γ = 20 kN/m^3
Friksjonsvinkel ϕ = 31^o
Mobiliseringsgrad f = 0,7
Ruhet r = 0,8

Følgende beregningsmetoder er brukt:

- Norske normer, Aadnesen (1973)

$$Q_F = \gamma B^2 \ (1{,}616\frac{H}{D} - 0{,}266) \qquad (15)$$

(H_e = 0,8B og K = 1 -sinϕ)

- Svenske normer, Eggwertz (1986)

$$Q_F = \gamma B^2 \ (1{,}79\frac{H}{D} - 0{,}42) \qquad (16)$$

(H_e = 0,97B og K = 1 - sinϕ)

- Dansk Standard, DS 437 (1986)
  Q_F = 1,6γHB
  (normal leggeklasse)
- Marston/Spangler, ACPA (1985)
  Ktanϕ = 0,19 og setningsforhold r_{SD}=0,7
- Vaslestad (1990)
  Ligning (14)

Det er beregnet vertikal laster for fyllingshøyden H fra 2 m til 16 m. Resultatet er satt opp i tabell 2.

Tabell 2. Vertikal last på betongrør etter ulike metoder.

		Vertikal last Q_F [kN/m]				
Fyllings-høyde H[m]	Vekt av jordsøyle γHB[kN/m]	Norske normer	Svenske normer	Dansk standard	Marston/ Spangler	Vaslestad
2	78	106	108	125	94	89
4	156	232	247	250	230	205
8	312	484	527	500	470	460
16	624	989	1086	1000	925	973

Resultatet er også fremstilt i figur 6.

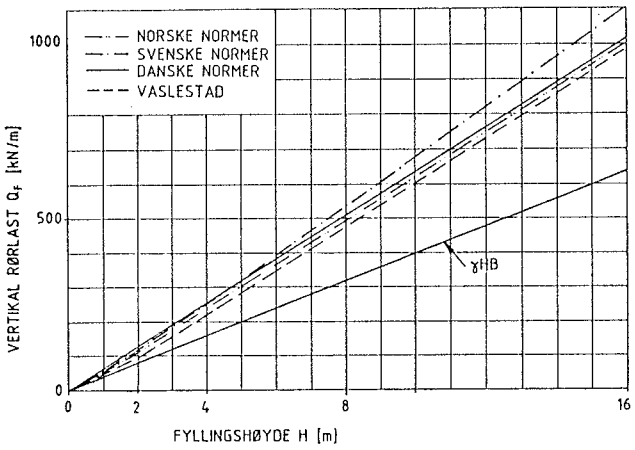


Fig. 6 Vertikal last på betongrør etter ulike beregningsmetoder

Av tabell 2 og fig. 6 kan det sees at den foreslåtte metode gir noe lavere vertikal last enn de øvrige metoder. Dette er i samsvar med full-skala forsøk på betongrør, Liedberg (1991), som påviste at Marston/Spangler's teori og den svenske normen gir for stor vertikallast.
Det er også i overensstemmelse med elementberegninger med programmet SPIDA, Selig og Packard (1986) og Liedberg (1991).

4. BELASTNINGSREDUKSJON VED BRUK AV KOMPRESSIBELT LAG

Ved stor fyllingshøyde over røret er det ønskelig å redusere vertikallasten. Ved å legge inn et kompressibelt lag over røret, vil dette laget presses sammen ved videre oppfylling og medføre en reduksjon av vertikallasten på røret. Prinsippet for metoden er vist i figur 7.

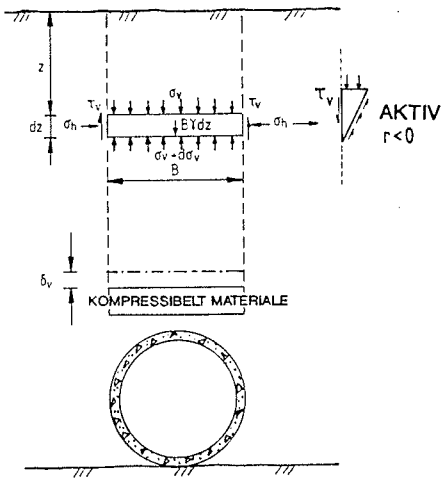


Fig. 7 Stivt rør med kompressibelt lag

Deformasjonen δ_v av jordprismet over røret, medfører at det mobiliseres oppadrettede skjærspenninger τ_v, og vertikallasten på røret reduseres (hvelvvirkning). Opprinnelig ble det brukt halmballer eller annet organisk materiale etter Marston/Spangler. I Norge har vi valgt å bruke ekspandert polystyren (EPS) i blokker med romvekt 20 kg/m^3, Vaslestad (1991). I Sverige er det brukt steinull som kompressibelt materiale, Liedberg (1991). I Danmark er det brukt bløt leire (gytje), Jørgensen og Lund (1988).
Spenningsbildet ligner mye på det som er i en grøftesituasjon, og tilsvarende regnes det med aktivt jordtrykk og ruhet $r < 0$.

Uttrykket for det vertikale jordtrykket blir det samme som ligning (10), der grøftebredden B_D byttes ut med bredden B på røret.

Ved en omformulering kan ligning (10) skrives på følgende måte:

$$\sigma_v = N_A \gamma H \qquad (17)$$

der N_A = Hvelvvirkningsfaktor

$$N_A = \frac{1 - e^{-A}}{A} \qquad (18)$$

$$\text{der } A = 2S_v \frac{H}{B} \qquad (19)$$

Med konstant $\frac{H}{B}$, er N_A en funksjon av ruheten r og mobilisert friksjon tanρ. I fig. 8 er hvelvvirkningsfaktoren N_A vist for H/B = 4.

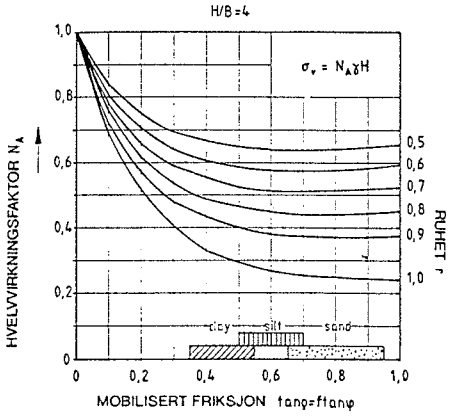


Fig. 8 Jordtrykk på rør med kompressibelt lag, H/B = 4.

Fullskalaforsøk på et betongrør med ytre diameter B = 1,95 m er utført på E18 Eidangerhalvøya i Norge, Vaslestad (1991). Jordtrykket over betongrøret ble målt og sammenlignet med beregnet jordtrykk etter ligning (17). Resultatet er vist i fig. 9.

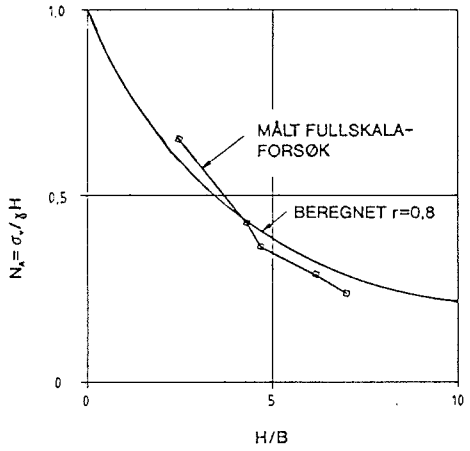


Fig. 9 Målt jordtrykk sammenlignet med beregnet

Fullskalaforsøket viste at det er en betydelig lastreduksjon og at reduksjonen holder seg over tid.

REFERANSER

American Concrete Pipe Association (ACPA) (1985). Concrete Pipe Design Manual.

Dansk Standard DS 437 (1986). Lægning af stive ledninger af betong mv. i jord.

Eggwerts S. (1986) Underlag for hållfasthetsdimensjonering av rørledning av armerad betong med jordoverfylling. Svenska vatten och avloppsforeningen VAV P48.

Janbu N. (1957). Earth pressure and bearing capacity calculations by generalised procedures of slices. Proceedings 4th ICSMFE, London, Vol. 2, pp. 207 - 212.

Janbu N. (1975). Earth pressure computations in theory and practice. Proceedings 5th ECSMFE, Madrid, Vol. 1, pp 47-54.

Janbu N. (1976). Static bearing capacity of friction piles. Proceedings 6th ECSMFE, Wien, Vol. III, pp. 479-488.

Janson J. (1965). Undersøkning avseende belastningar. På styva rør i mark. Kunglige Vag- och Vasttenbyggnadsstyrelsen, Vatten- och Avloppsbyrån, P 181.

Jørgensen M.B. og Lund W. (1988). Aflastning af kloakrør ved indbygning av blødt ler over rørtoppen. Nordisk Geoteknisk Møte, Oslo, 284-288.

Krizek R.J. et.al (1971). Structural Analyses and Design of Pipe Culverts. NCHRP Report 116, Highway Research Board.

Leonhardt G. (1979). Die Erdlasten bei uberschutteten Durchlassen. Die Bautechnik, Vol.56, No 11, pp 361 - 367.

Liedberg S. (1991). Earth pressure distribution against rigid pipes under various bedding conditions. Full scale field tests in sand. Dr. ing. thesis, Chalmers Tekniska Høgskola.

Selig E.T. and Packard D.L. (1986). Buried concrete pipe embankment installation analyses. Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.112, No6. pp.576-592.

Spangler M.G. and Handy R.L. (1982). Underground conduits, Soil Engineering, 4th Edition, Harper and Row Publishers, New York.

Vaslestad J. (1990). Soil structure interaction og buried culverts. Dr.ing. avhandling, Institutt for geoteknikk, Norges Tekniske Høgskole.

Vaslestad J. (1991). Load reduction on buried rigid pipes. Proceedings 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence Vol. 2, 771 - 774.

Aadnesen L. (1973). NBI-anvisning nr. 7. Beregning og dimensjonering av nedgravde betongrør.