

Pælefundering af Bryggen, Vejle

Helle Trankjær

COWI A/S, Danmark, hlt@cowi.dk

Abstract: I Vejle midtby er butikscentret Bryggen opført i 2006 - 2008. Byggeriet er funderet på nedrammede jernbetonpæle. På grund af relativt store pælelaster (600 - 700 kN/pæl) og et forventet stort antal (ca. 3.000 stk.) lange pæle, blev der tidligt i projektforslaget udført statiske belastningsforsøg på testpæle til verifikation af pælernes trykbrudbæreevne. Da en stor del af pælene var placeret i grupper under butikscentrets bærende søjler, blev en del af prøvepælene indrammet med henblik på at studere gruppeeffekten. På udvalgte prøvepæle blev der i forbindelse med esterramningen udført stødbølgemålinger. Der blev i alt indrammet ca. 150 prøvepæle og 1.950 produktionspæle med længder, der var reduceret betydeligt i forhold til de forventede. Undersøgelingsprogrammet medførte således et økonomisk fordelagtigt pæleprojekt for bygherren.

1 INDLEDNING

Bryggen-projektet er i perioden forår 2006 - forår 2008 opført i Vejle Midtby, umiddelbart op ad Sønderåen. Byggeriet består af et center med 23.000 m² butiksareal og 700 parkeringspladser på de to øverste etager i bygningen.

I henhold til den danske funderingsnorm, DS 415, er byggeriets fundering henført til normal funderingsklasse og normal sikkerhedsklasse.

Som følge af stærkt sætningsgivende aflejringer til stor dybde er butikscentret pælefunderet. Butikscentret er generelt funderet på nedrammede, 300 mm x 300 mm jernbetonpæle. Af hensyn til sikring af en revneskadet naboejendom er der i grundens sydøstlige hjørne anvendt 250 mm x 250 mm jernbetonpæle, for hvilke der blev forboret igennem fyldlag.

Ca. 2/3 af pælene står i grupper af 9 stk. pæle under butikscentrets bærende søjler. De resterende ca. 1/3 af pælene står som enkeltpæle under stribefundamentterne. Den regningsmæssige tryklaster, F_{cd} , på 300 mm x 300 mm-pælene ligger typisk på 580 kN for enkeltpælene og 680 kN for gruppepælene.

Pælene blev asfalteret ned til kote -3,2 a -8,4 m, svarende til underside af stærkt sætningsgivende aflejringer.

2 JORDBUNDS- OG TERRÆNFORHOLD

Grunden ligger i Vejle midtby, i området mellem Enghavevej, Damhaven, Sønderbrogade og Sønderåen, hvor eksisterende terræn var beliggende i kote +1,4 a +2,2 m. Butikscentret er opført med stuegulv i kote +2,45 m.

Jordbundsforholdene på grunden må betragtes som værende relativt ensartede, og typiske for Vejle midtby.

I de udførte geotekniske borerer er der øverst truffet 2,1 á 4,1 m fyld, underlejret af 8,2 á 11,7 m postglaciale aflejringer, svarende til underside beliggende i kote -9,9 á -12,1 m. De postglaciale aflejringer består af tørv, gytje og ler samt stedvis gytjeblandet sand og grus.

Under de postglaciale aflejringer og til bunden af borerne blev der truffet senglaciale/glaciale aflejringer af smeltevandsaflejret, svagt til stærkt gruset, mellem-grovkornet sand med enkelte sten. Sandet må betragtes som værende middellejret.

Det primære grundvandspejl er i de udførte borerer indmålt i kote +0,2 á +0,6 m.

3 STATISKE BELASTNINGSFORSØG

3.1 Formål

Da indledende geostatistiske beregninger viste, at der skulle nedbringes et meget stort antal (ca. 3.000 stk.) meget lange (op til 18 m) pæle, blev det tidligt i projektføreløbet besluttet, at der skulle udføres statiske belastningsforsøg på testpæle til verifikation af pælernes trykbrudbæreevne, R_{cd} .

Formålet med de statiske belastningsforsøg var:

- at sikre et robust pæleprojekt, herunder minimere de samlede omkostninger
- at dokumentere, at pælernes trykbrudbæreevne, $R_{cm,belastning}$ som minimum var lig bæreevnen bestemt ved hjælp af Den Danske Rammeformel, $R_{dynk,IND,DDR}$
- at vurdere om en regningsmæssig trykbæreevne på ca. 700 kN pr. pæl, svarende til 9 pæle under butikscentrets bærende søjler, var realistisk
- at tilegne sig viden om bundforhold/pælebæreevner således, at partialkoefficienten kunne reduceres

3.2 Forsøgsprogram

Testpælene, på hvilke der blev lavet statiske belastningsforsøg, skulle være repræsentative for det samlede antal produktionspæle, hvad angår pæletværsnit, pælelængde og jordbundsforhold.

På baggrund heraf blev det vurderet, at der skulle udføres statiske trykbelastningsforsøg på 4 stk. 17 m lange 300 mm x 300 mm testpæle fordelt ud over grunden.

De 4 testpæle blev indrammet til ca. spidskote -14,4 m, og 3 - 5 dage efter indramning blev der udført stødbølgemålinger på pælene i forbindelse med efterramning. Trykbelastningsforsøgene blev udført 8 - 14 dage efter testpælernes indramning.

3.3 Forsøgsresultater

De målte trykbrudbæreevner for de 4 testpæle fremgår af tabel 1:

Tabel 1 Målt trykbrudbæreevne for 4 testpæle

Testpæl	Boring	Geostatisk	Indramning	Efterramning	Stødbølgemålinger	Belastningsforsøg
Nr.	Nr.	$R_{cm,geostatisk}$ (kN)	$R_{dynk,IND,DDR}$ (kN)	$R_{dynk,EFTER,DDR}$ (kN)	$R_{dynk,EFTER,PDA}$ (kN)	$R_{cm,belastning}$ (kN)
F-04.21	B 1	970	800	1390	1050	900
E-13.21	B 6	1120	960	1310	1320	1200
C-04.22	B 8	1130	960	1450	1270	1000
B-19.22	B 10	1110	1000	1620	1620	1400

$R_{cm,geostatisk}$:	Geostatisk beregning
$R_{dynk,IND,DDR}$:	Den Danske Rammeformel ved indramning
$R_{dynk,efter,DDR}$:	Den Danske Rammeformel ved efterramning
$R_{dynk,EFTER,PDA}$:	Stødbølgemålinger, CAP-WAP-analyse, ved efterramning
$R_{cm,belastning}$:	Statiske belastningsforsøg (sidste lasttrin inden brud)

Af tabel 1 fremgår det, at den målte brudbæreevne af de 4 testpæle ved trykbelastning, $R_{cm,belastning}$, ligger 4 - 40 % over bæreevnen ved indramning, $R_{dynk,IND,DDR}$. Endvidere fremgår det, at bæreevnen bestemt ved hjælp af stødbølgemålinger, $R_{dynk,EFTER,PDA}$, eller ved hjælp af Den Danske rammeformel, $R_{dynk,EFTER,DDR}$ i forbindelse med efterramning generelt overvurderer bæreevnen i forhold til den faktiske bæreevne, $R_{cm,belastning}$.

4 PRØVEPÆLE

4.1 Generelt

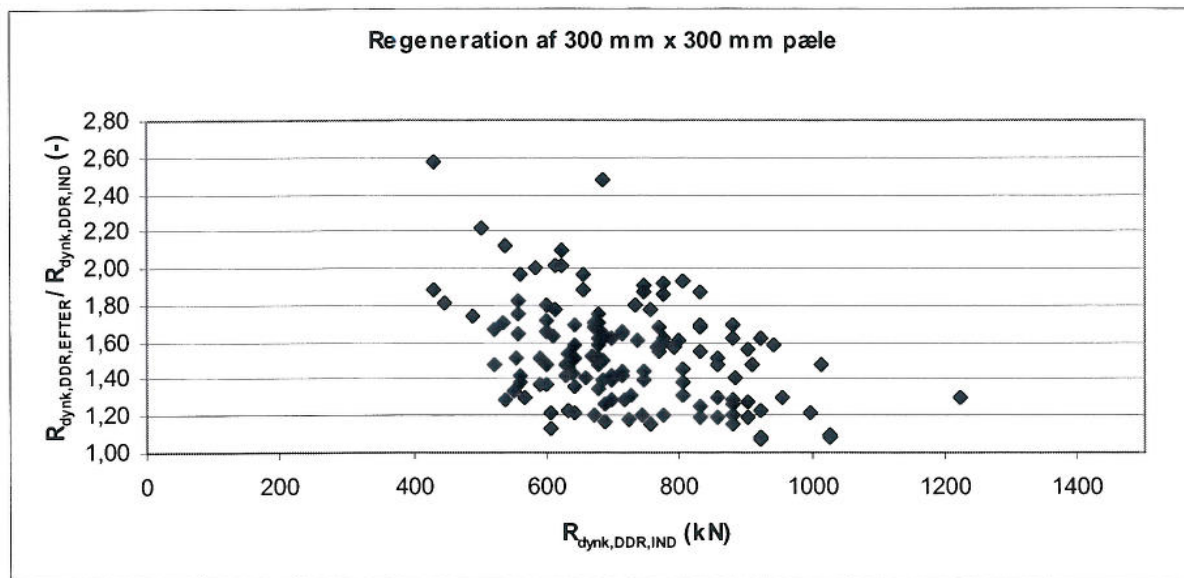
For projektet blev der i alt rammet 150 stk. 300 mm x 300 mm prøvepæle fordelt jævnt ud over byggefeltet:

Prøvepælene blev tidligst efterrammet dagen efter indramningen. Ved efterramningen blev nedsynkningen registreret for 3 ramslag. På udvalgte prøvepæle blev der i forbindelse med efterramningen udført stødbølgemålinger.

Prøvepælernes ind- og efterramningsresultater dannede grundlag for fastlæggelse af produktionspælernes længder og for justering af produktionspælernes asfalteringslængder.

4.2 Enkeltpæle

Da cirka halvdelen af pælernes bæreevne skyldes pælernes overflademodstand (primært i sand), øges pælernes bæreevne i tiden efter indramning. Af figur 1 fremgår det, at enkeltstående prøvepæle opnåede en styrketilvækst ved efterramning, 1 á 13 dage efter indramning, på mellem 7 og 157 % ($R_{dynk,DDR,EFTER}/R_{dynk,DDR,IND}$).



Figur 1 Ind- og efterramningsresultater for 300 mm x 300 mm enkeltstående prøvepæle, nedrammet til spidskote -13 a -16 m

Figur 1 viser også en meget stor spredning på den opnåede styrketilvækst. På baggrund heraf og på baggrund af resultaterne af de 4 prøvebelastningsforsøg blev det vurderet, at der generelt kunne regnes med 10 % styrkeforøgelse i forhold til bæreevnen ved indramning, $R_{\text{dynk,DDR,ind}}$.

4.3 Gruppepæle

En stor del af projektets pæle er placeret i grupper under butikscentrets bærende søjler.

Da ramning af pæle i grupper typisk giver en komprimeringseffekt i sandaflejringerne således, at de sidst rammede pæle ikke skal rammes så dybt som de første for at opnå samme bæreevne, blev det tidligt i projektførløbet besluttet, at denne gruppeeffekt skulle studeres nærmere.

98 stk. af de i alt 150 prøvepæle blev rammet i grupper, heraf 10 pælegrupper med 9 pæle.

I 5 ud af de 10 pælegrupper blev gruppeeffekten studeret specielt med henblik på at kunne opstille en model for, hvor stor bæreevnetilvækst der kan regnes med som følge af gruppeeffekten.

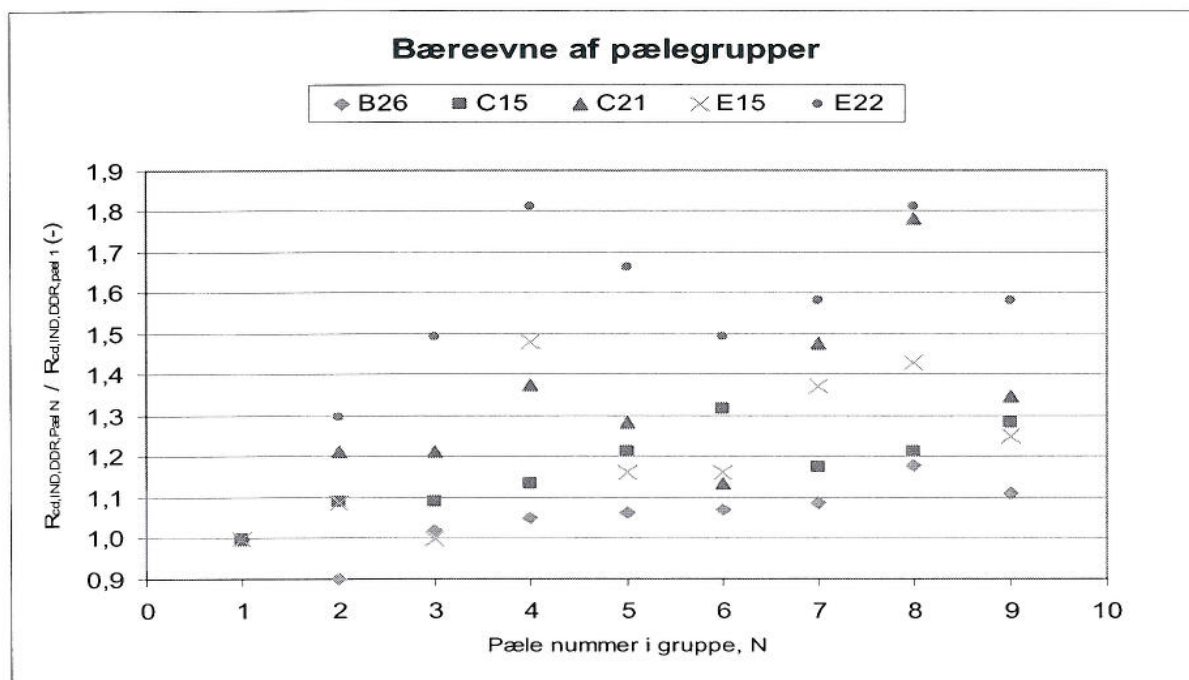
De 5 grupper á 9 pæle blev indrammet efter følgende procedure:

1. Prøvepæl nr. 1 i gruppen blev rammet med registrering af hele rammeforløbet.
2. Umiddelbart efter indramning efterrammes prøvepæl nr. 1. I forbindelse med efterramningen blev der udført stødbølgemålinger (PDA med CAP-WAP-analyse) til kontrol af pælens trykbæreevne og fordelingen mellem spids- og overfladebæreevne.

- De resterende pæle, pæl nr. 2 - 9, blev rammet med registrering af hele rammeforløbet.
- Efter 3 dage blev prøvepæl nr. 1 - 9 efterrammet. I forbindelse med efterramningen blev der udført stødbølgemålinger til kontrol af pælernes bæreevne, herunder CAP-WAP-analyser på pæl nr. 1 og pæl nr. 5 (centerpæl) og CASE-analyser på de resterende pæle i gruppen.

Figur 2 viser den opnåede bæreevne ved indramning af pæl nr. N i gruppen, sammenlignet med den først rammede pæl, pæl nr. 1. Det ses, at den opnåede bæreevne af gruppepælene generelt var større end den først rammede, enkeltstående pæl.

Indranningsbæreevnen forventes at afhænge dels af placeringen,- herunder den horisontale spænding, og dels af i hvilken rækkefølge pælene er rammet. Det har dog ikke vist sig muligt at opstille en teoretisk model for den enkelte gruppepæls forventede bæreevne.



Figur 2 Indranningsresultater for 300 mm x 300 mm gruppepæle

Ses der på forholdene for et større antal pælegrupper, fremgår det af tabel 2, at gruppeeffekten ved indramning ikke skinner så tydeligt igennem for alle grupper. Men efterranningsresultaterne viser tydeligt den opnåede gruppeeffekt, idet den gennemsnitlige pælebæreevne af den samlede gruppe var 39 - 150 % større end bæreevnen af pæl nr. 1.

Tabel 2 Gennemsnitlig bæreevne af samlet gruppe sat i forhold til den først rammede pæl i gruppen

Spids- kote (m)	Gruppe- nr.	1. pæl	Hele gruppe	Hele gruppe
		Indramning	Indramning	Efterramning
		$R_{cd,IND,pæl_1}$	$R_{cd,IND,alle_pæle}/R_{cd,IND,pæl_1}$	$R_{cd,EFTER,alle_pæle}/R_{cd,IND,pæl_1}$
		(kN)	(kN)	(kN)
-12,2	B-26	629	1,05	1,52
-12,8	G-10	679	1,21	1,72
-12,8	E-08	714	1,24	1,76
-12,8	D-04	679	1,21	1,94
-13,8	H-23	885	0,90	1,39
-14,4	C-15	686	1,17	2,07
-14,4	C-21	686	1,31	2,17
-14,4	E-22	429	1,53	2,50
-15,5	E-15	537	1,21	2,20

Ind- og efterramningsresultaterne for gruppepælene viste en gruppeeffekt som i henhold til stødbølgemålingerne var et resultat af, at den horisontale spænding omkring pælene og dermed overflademodstanden på pælene voksede ved indramning af de tætstående pæle.

Det viste sig dog ikke muligt at opstille en teoretisk model for gruppeeffekten, men konklusionen var, at længden af gruppepælene kunne reduceres betydeligt (2 - 5 m).

5 PRODUKTIONSPÆLE

5.1 Regningsmæssig trykbæreevne

Idet der blev udført et antal repræsentative statiske belastningsforsøg på testpæle, kan den regningsmæssige trykbæreevne for produktionspælene, R_{cd} , bestemmes ved hjælp af følgende formel:

$$R_{cd} = R_{ck} / \gamma_b$$

$$R_{cd} = R_{cm} / (\zeta \gamma_b)$$

Hvor: R_{cd} : Regningsmæssig trykbæreevne
 R_{ck} : Karakteristisk trykbæreevne
 R_{cm} : Målt trykbæreevne
 ζ : Omregningsfaktor, $\zeta = 1,25$
 γ_b : Partialkoefficient, $\gamma_b = 1,3$

Idet pælene er rammet ned i bæredygtige sandaflejringer, og de statiske belastningsforsøg viste en målt trykbrudbæreevne, $R_{cm, \text{belastning}}$, der som minimum var lig bæreevnen ved indramning, bestemt ved hjælp af Den Danske Rammeformel, $R_{\text{dynk,IND,DDR}}$, kan den regningsmæssige trykbæreevne for produktionspælene bestemmes ved hjælp af følgende formel:

$$R_{cd} = R_{cm} / 1,63 = R_{\text{dynk,IND,DDR}} / 1,63$$

Hvor $R_{\text{dynk,IND,DDR}}$: Målt trykbæreevne under indramning, bestemt ved hjælp af Den Danske Rammeformel

I henhold til erfaringerne for prøvepælene, blev det i henhold til afsnit 4.2. generelt valgt at tillægge 10 % til bæreevnen som følge af den forventede styrkeforøgelse (regeneration) i tiden efter indramning.

5.2 Indramning af pæle

Produktionspælenes længder blev fastlagt på grundlag af ind- og efterramningsresultaterne for prøvepælene.

Af deformationshensyn blev det tilstræbt, at produktionspælenes spids som minimum stod mindst 1 m nede i det bæredygtige senglaciale eller glaciale smeltevandssand. Gruppepælenes længder viste sig typisk at være bestemt af denne begrænsning.

I perioden juli 2006 - februar 2007 blev der indrammet 1.855 stk. 12 a 18 m lange 300 mm x 300 mm jernbetonpæle, og 95 stk. 13 m lange 250 mm x 250 mm jernbetonpæle.

6 SAMMENFATNING

En gennemgang af Bryggen-projektet viser, at man ved tilstrækkelige forundersøgelser, herunder konkrete statiske belastningsforsøg på testpæle og studie af gruppeeffekten på prøvepæle, kan projektere et økonomisk fordelagtigt pæleprojekt for bygherren.

7 PROJEKTETS PARTER

Der rettes en tak til NCC Construction A/S for tilladelse til at publicere denne artikel. De øvrige relevante parter for artiklen er:

- Hercules Fundering A/S, underentreprenør for ramning af pæle
- CP test A/S, Vejle, underentreprenør for stødbølgemålinger på pæle
- Per Aarsleff A/S, underentreprenør for statiske prøvebelastningsforsøg
- COWI A/S, rådgiver for NCC Construction A/S, projektering af byggeri