

Sikkerheden ved beregning af rammede betonpæles bæreevne i dansk moræneler.

Poul Larsen

*GEO - Danish Geotechnical Institute, pol@geo.dk*

Ulla Schiellerup

*GEO - Danish Geotechnical Institute, uls@geo.dk*

*Abstract: I forbindelse med et stort pæleprojekt i det nordlige Sjælland har GEO vurderet bæreevnen af rammede jernbetonpæle i moræneler. Pælens bæreevne er beregnet såvel geostatisk på grundlag af boringer som ud fra Den danske Rammeformel. De beregnede bæreevner er sammenholdt med bæreevnen opnået ved belastningsforsøg. Forsøgene viser, at den geostatisk beregnede bæreevne ikke altid giver den sikkerhed, som vi forventer.*

## 1 INTRODUKTION

I den nordøstlige del af Sjælland nær ved Hillerød er der opført et større pælefunderet byggeri i et morænelandskab. Funderingen er gennemført i skærpet funderingsklasse (geoteknisk kategori 3), hvorfor der er udført tryk prøvebelastninger på 4 pæle. Ved byggeriet er der anvendt præfabrikerede jernbetonpæle med sidelængde 250 mm og 300 mm. I projektet var det forudsat, at pælene skulle belastes med en regningsmæssig last på 600 kN og 900 kN pr pæl for hver af de to pæledimensioner.

## 2 JORDBUNDSFORHOLD

Jordbundsforholdene blev forud for projekteringen bedømt ud fra 4 boringer til under pælespidsniveau. De 4 boringer blev udført nær ved byggefeltets hjørner. Denne indledende undersøgelse blev senere suppleret med yderligere en boring for at afdække eventuelt afvigende jordbundsforhold i det område, hvor der var de største vanskeligheder med tolkningen af pælens bæreevne.

Jordbundsforholdene på arealet er typiske for området. De består af ca. 1 m overjord underlejret af relativt bløde/løse senglaciale ler- og sandlag til ca. 4 meters dybde. Herunder mødes en typisk dansk grå moræneler, der et stykke under pælespids afløses af smeltevandsaflejringer.

Moræneleren er sandet, let gruset og kalkholdig. Vandindholdet varierer mellem 11 og 14 %, men ligger i middel på 12 %. Plasticitetsindekset er målt til 9,3 à 10,6 %. Styrken er målt med vingeforsøg i borehullerne til  $c_v = 200$  à  $400 \text{ kN/m}^2$  med enkelte højere værdier. I Danmark har vi erfaring for, at den udrænede forskydningsstyrke  $c_u$  i moræneler er lig med den ved vingeforsøg målte forskydningsstyrke  $c_v$ , dvs.  $c_u = c_v$ .

Grundvandsspejlet ligger få meter under terræn.

### 3 GEOSTATISK BÆREEVNEBEREGNING

Baseret på de udførte fire geotekniske borer blev der udført beregninger af den geostatisk beregnede bæreevne  $R_{c;ber}$  for pælene. Der blev forudsat en overflademodstand svarende til en regeneration på  $r = 0,4$  og en spidsfaktor på 18 i moræneleren. I de efterfølgende skemaer er  $R_{c;ber}$  angivet svarende til det aktuelle pæespidsniveau.

### 4 RAMMEMODSTAND

Rammearbejdet er udført med en Junttan PM20 med et 60 kN ramslag og en effektivitetsfaktor på 0,95.

Den målte rammemodstand  $R_{dyn;m}$  er beregnet med Den danske Rammeformel som defineret i Eurocode 7 med det danske nationale anneks.

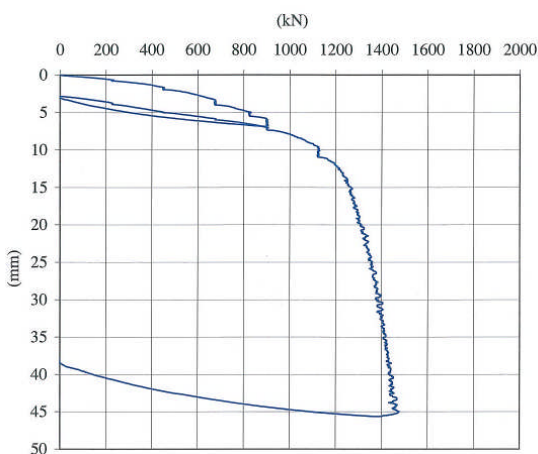
Rammemodstanden for de prøvebelastede pæle indgår ligeledes i skemaerne nedenfor.

### 5 BELASTNINGSFORSØG

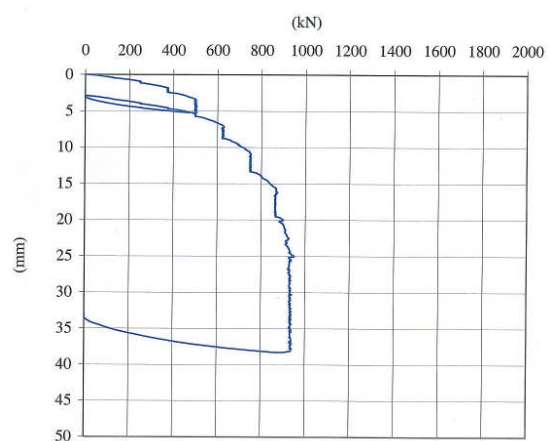
Der er udført belastningsforsøg på 4 jernbetonpæle placeret nær ved hver af de indledende dybe geotekniske borer. Den målte trykbæreevne  $R_{c;m}$  for pælene fremgår af nedenstående skema.

Skema over trykbæreevnen for de 4 jernbetonpæle.

Boring nr.	Pæl nr.	Pæledim. mm <sup>2</sup>	Rammedybde m	$R_{c;ber}$ kN	$R_{dyn;m}$ kN	$R_{c;m}$ kN
1-NV	P1	300 x 300	12	1455	1784	1450
2-NØ	P2	300 x 300	8	1050	1817	1420
3-SØ	P3	250 x 250	10	1170	1124	1120
4-SV	P4	250 x 250	12	1275	1068	930



Arbejdskurve for pæl P2



Arbejdskurve for pæl P4

Alle belastningsforsøg er udført mindst 1 måned efter at pælene er rammet.

Belastningsforsøgene er udført af Aarsleff A/S, og arbejdskurver for 2 af forsøgene er vist ovenfor. Brudværdien  $R_{c;m}$  er defineret som enten den maksimale last, som kan bibeholdes med en deformationshastighed på  $\leq 20$  mm/time eller den last, som efter aflastning medfører en ”blivende” deformation på 10 % af pælens tværsnitsdimension (bredde).

## 6 MÅLTE PÆLEBÆREEVNER

Det er den målte trykbæreevne  $R_{c;m}$  ved belastningsforsøgene, der repræsenterer pælens virkelige statiske bæreevne på måletidspunktet. Den geostatisk beregnede bæreevne  $R_{c;ber}$  er en beregnet værdi for bæreevnen ud fra borerne, ligesom den dynamiske bæreevne  $R_{dyn;m}$  er et skøn over den statiske bæreevne på basis af rammemodstanden.

Sammenlignes den målte trykbæreevne med de beregnede værdier fås forhold, som vist i nedenstående skema.

*De beregnede bæreevner i forhold til den målte bæreevne.*

Pæl nr.	$R_{c;m}$ kN	$R_{c;ber}/R_{c;m}$	$R_{dyn;m}/R_{c;m}$
P1	1450	1,00	1,23
P2	1420	0,74	1,28
P3	1120	1,04	1,00
P4	930	1,37	1,15

Af skemaet ses at  $R_{dyn;m}$  er for optimistisk for tre af de fire pæle, og for den fjerde pæl er  $R_{dyn;m}$  lig med den målte værdi. Dette er atypisk for en dansk moræneler, idet bæreevnen baseret på rammemodstanden normalt ses at være mindre – måske endog en del mindre – end den ved belastningsforsøg målte værdi, fordi overflademodstanden ikke bidrager væsentligt til rammemodstanden.

Den målte bæreevne  $R_{c;m}$  er sammenfaldende med eller mindre end geostatisk beregnede bæreevne  $R_{c;ber}$  for tre af pælene. For den ene af disse 3 pæle er den målte bæreevne endda betydeligt lavere end forventet ud fra den geostatisk beregnede bæreevne baseret på borerne. Det er usædvanligt at se så stor afvigelse – på den usikre side – for den beregnede bæreevne.

På grund af denne uoverensstemmelse, hvor de beregnede værdier synes at være for optimistiske, blev der udført en supplerende dyb boring ved pæl P4. Denne nye boring viste imidlertid jordbundsforhold i overensstemmelse med boringen fra forundersøgelserne. Den nye boring gav derfor ikke anledning til ændringer i størrelsen af den beregnede bæreevne.

## 7 KARAKTERISTISKE PÆLEBÆREEVNER

Ovennævnte vurderinger er baseret på en direkte sammenligning af de beregnede og de direkte målte bæreevner. Vælger vi derimod at sammenligne de ud fra normal dansk praksis valgte karakteristiske værdier, fås forhold som vist i nedenstående skema.

De karakteristiske værdier skal vælges som nedreværdier. Disse værdier skal vælges, så der med 95 % sandsynlighed ikke forekommer en lavere værdi, der styrer brudgrænsetilstanden.

For alle pælene i bygningen, hvis bæreevne skal baseres på de udførte belastningsforsøg og beregninger, vil de karakteristiske værdier af bæreevnen efter normal dansk praksis kunne udtrykkes ved:

- $R_{c;k} = R_{c;m} / 1,25$  (1,1 for selve den prøvebelastede pæl);
- $R_{c;ber;k} = R_{c;ber} / 1,5$  og
- $R_{dyn;k} = R_{dyn;m} / 1,5$ .

*Forholdet mellem de karakteristiske værdier af pælens bæreevne*

Pæl nr.	$R_{c;k}$ kN	$R_{c;ber;k}/R_{c;k}$	$R_{dyn;k}/R_{c;k}$
P1	1160	0,83	1,02
P2	1136	0,62	1,06
P3	896	0,87	0,83
P4	744	1,14	0,96

Baseres projektet på belastningsforsøg vil det enkelte forsøg kunne ligge til grund for det pæleområde, som dette enkelte forsøg repræsenterer, og ud fra statistiske betragtninger vælges de karakteristiske værdier ud fra de målte ved at dividere med 1,25.

Havde vi ikke haft belastningsforsøgene, men alene de geostatistiske beregnede bæreevner baseret på borerne, så ville vi for tre af pælene have valgt en karakteristisk bæreevne, som var 62 à 87 % af værdierne fra belastningsforsøget. Det ville altså være på den sikre side. Men for den fjerde pæl (P4) ville vi vælge en karakteristisk bæreevne, der var 14 % højere end den målte. Vi har alene registreret det i forbindelse med dette projekt, og det er således den primære årsag til denne artikel. Ovennævnte 14% vil dog ligge inden for den normale sikkerhed/partialkoefficient på 1,3.

De karakteristiske værdier for bæreevnen baseret på rammemodstanden,  $R_{dyn;k}$  ligger på 83 à 106 % af de karakteristiske værdier baseret på de målte bæreevner. Som tidligere omtalt er dette nogle meget høje værdier for rammede pæle i moræneler, men de vil sædvanligvis ikke kunne stå alene. Normalt vil de blive vurderet op mod en geostatisk beregning. Skulle de stå alene ville vi reducere de karakteristiske værdier med yderligere 25 % svarende til geoteknik kategori 1, hvorved de alle vil være på den sikre side i forhold til de målte bæreevner.

## 8 MULIGE ÅRSAGER

Vi har ikke kunnet indkredse en årsag til afvigelsen, men kan nævne nogle forhold, der kan være medvirkende til at den målte bæreevne er lavere end forventet i forhold til den geostatisk beregnede bæreevne.

En af årsagerne kunne være en lav og ikke fuldt udviklet regeneration i jorden omkring pælen. Det kan naturligvis ikke afvises, at regenerationen ikke er nået helt op på 0,4, men med mere end 4 uger fra indramningen af pælen til forsøg med pælen, anser vi normalt en – ikke specielt fed – moræneler for stort set at være regenereret.

En anden og måske mere sandsynlig årsag kunne være, at vi ved brug af spidsfaktoren på 18 i den geostatistiske beregning overvurderer bæreevnen i den aktuelle jord.

Rammeformelen overvurderer også bæreevnen i 3 ud af 4 tilfælde. Det er vanskeligt at forklare, idet rammemodstanden i en – ikke specielt fast – moræneler normalt vil undervurdere bæreevnen. Dette kunne tyde på at jorden optræder som et friktionsmateriale, men med et plasticitetsindeks på ca. 10 % vil jorden normalt opføre sig som en kohæsiv jord.

Beregningerne baseret på såvel de registrerede jordbundsforhold, som på rammemodstanden overvurderer således også bæreevnen i flere tilfælde, men vi har ikke kunnet indkredse en entydig årsag. Vi gør derfor opmærksom på, at den forventede sikkerhed ikke nødvendigvis altid er til stede ved pæleprojekter, der alene baseres på beregnede bæreevner.

## 9 KONKLUSION.

Den ved belastningsforsøg målte bæreevne for en ud af fire jernbetonpæle i moræneler er meget lav i forhold til normal dansk praksis. Det indikerer, at der ikke altid er den forventede sikkerhed på de beregnede pælebæreevner. Dette taler for en hyppigere udførelse af belastningsforsøg i forbindelse med pæleprojekter end det forekommer i dag.