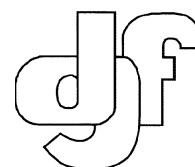


# **DYNAMISK PRØVEBELASTNING AF PÆLE**

## **PDA-MÅLINGER, CASE- OG CAPWAP- ANALYSER**

VEJLEDNING NR. 1

DANSK GEOTEKNISK FORENING  
PÆLEKOMITÉEN  
JUNI 2021



**INDHOLD**

1	Introduktion .....	3
2	Termer og definitioner .....	3
3	Forudsætninger for stødbølgeanalyse .....	5
4	CASE- og CAPWAP-analyse .....	6
4.1	CASE-analyse.....	6
4.1.1	Resultater .....	6
4.2	CAPWAP-analyse .....	8
4.2.1	Resultater .....	8
4.2.2	Brug af CAPWAP-resultater .....	10
5	PDA-målinger på rammede pæle.....	11
5.1	Anvendelsesområde.....	11
5.2	Hensyntagen til jordbundsforhold og valg af tidspunkt for PDA-måling .....	11
5.3	Vurdering af trækbæreevne .....	12
6	PDA-målinger på borede pæle.....	12
6.1	Anvendelsesområde.....	12
6.2	Vurdering af pælebæreevne.....	12
7	Normmæssig behandling .....	13
8	Litteraturliste.....	14
9	Bidragydere til udarbejdelse af vejledningen .....	14

**BILAG**

Nr.	Rev.	Indhold
1	0	Engelske termer og eksempler på deres anvendelse

## 1 INTRODUKTION

Denne vejledning er udarbejdet af Pælekomiteen under Dansk Geoteknisk Forening. Vejledningen omfatter dynamisk prøvebelastning af pæle, herunder PDA-målinger, CASE- og CAPWAP-analyser. Det skal understreges, at denne vejledning ikke er udtømmende, og at måleresultaterne og analyserne fra de dynamiske prøvebelastninger ikke kan stå alene, og der skal således altid foretages en ingeniørmæssig vurdering af forholdene.

Denne vejledning omfatter:

- Termer i forbindelse med analyse af måledata fra rammeforløb og fra efterramningsforløb, som samlet betegnes dynamisk prøvebelastning
- Nødvendige forudsætninger og informationer for at kunne udføre en pålidelig stødbølgeanalyse – med eller uden stødbølgemålinger
- Forklaring til output af CASE- og CAPWAP-analyser, illustreret ved et par eksempler
- Muligheder/begrænsninger for brugen af PDA for rammede og borede pæle
- Normmæssig behandling af resultater fra dynamisk prøvebelastning

## 2 TERMER OG DEFINITIONER

Med reference til termer anvendt i DS/EN 1997-1:2007, herefter blot EC7-1, (identisk med EN 1997-1:2004 (E)) i afsnittene:

- 7.5.3 Dynamiske belastningsforsøg (Dynamic load tests)
- 7.6.2.4 Brudbæreevne baseret på dynamisk prøvebelastning (Ultimate compressive resistance from dynamic impact tests)
- 7.6.2.6 Brudbæreevne baseret på stødbølgeanalyse (Ultimate compressive resistance from wave equation analysis)

og det tilhørende danske nationale anneks, DS/EN 1997-1 DK NA:2020, herefter blot DK NA, samt den i branchen anvendte terminologi, herunder DS/EN ISO 22477-4:2018, part 4, gives der i det følgende en forklaring på disse termer samt en beskrivelse af analyser med og uden målinger af stødbølger.

Dynamiske belastningsforsøg er udviklet i USA, hvorfor en del danske termer mere eller mindre er direkte adopteret herfra. I bilag 1 er angivet relevante engelske termer fra udvalgte kilder og deres betydning, men som det fremgår, er benævnelserne ikke entydige på engelsk, og de danske termer og definitioner anvendt i EC7-1 og DK NA er heller ikke konsekvente. Derfor anbefaler Pælekomiteen, at termer og definitioner i Tabel 1 bruges på dansk.

Sammenfattende er en **stødbølgeanalyse** den helt overordnede betegnelse for en *wave equation analysis* – med eller uden stødbølgemålinger involveret.

Stødbølgeanalyser kan således underopdeles i:

- **CASE- og CAPWAP-analyser**, som er analyser af målte stødbølger fra **high strain** impact load test (dynamisk prøvebelastning med tung hammer). CAPWAP-analysen går også under navnet signal matching analyse. Et tilsvarende synonym findes ikke for CASE-analysen.
- **Integritetstest** eller integritetsmåling, som er en måling af én eller flere stødbølger fra en **low strain** impact load test (dynamisk prøvebelastning med let hammer).
- **Driveability-analyse** eller rambarhedsanalyse, som er en computersimulering af en teoretisk stødbølge, altså en simulering af et rammeforløb og en ren skrivebordsanalyse uden stødbølgemålinger.

Når man i branchen bruger betegnelsen stødbølgeanalyse, skal man altså være opmærksom på, at denne fællesbetegnelse dækker bredt og således ikke kan stå alene. Man er nødt til at specificere, hvilken type stødbølgeanalyse, der tænkes på.

Tabel 1 Anbefalede termer og definitioner på dansk

Engelsk begreb	Anbefalet dansk oversættelse	Begrundelse for anbefalingen
<b>Dynamic Load Test</b> – mere specifikt [High-Strain] <b>Dynamic Impact Tests</b>	<b>Dynamisk prøvebelastning</b> , i daglig tale <b>PDA-måling</b> <sup>1)</sup>	Benævnelsen PDA-måling er meget udbredt og dækker underforstået stødbølgemåling i forbindelse med dynamisk prøvebelastning.  Dynamisk prøvebelastning udføres med en hammer, der kan flytte pælen, dvs. har energi nok (high strain) – i modsætning til en integritetstest (low strain).
CASE-method analysis	CASE-metode-analyse <b>CASE-analyse</b>	PDA-måling i sin oprindelige, enkle form, hvor man ud fra et målt kraft- og hastighedssignal med en enkelt jordafhængig parameter (dæmpningen J) kan analysere sig frem til pælens totale trykbæreevne.
Signal matching analysis	Signal matching analyse <b>CAPWAP-analyse</b>	Udtrykket <i>Signal matching analyse</i> er svært forståeligt, men antyder dog, hvad det handler om: at få et målt signal (respons) til at passe (matche) med det teoretiske/beregne signal fra computerprogrammet.  CAPWAP er blot et af flere programmer, som kan benyttes til signal matching analyse, men da det er det hyppigst anvendte i Danmark, anbefales det at anvende termen CAPWAP-analyse.
Wave Equation Analysis	<b>Driveability-analyse</b> (Ramarhedsanalyse)	Der er tale om en simulering af et rammeformløb; det vil sige en teoretisk skrivebordsanalyse uden målinger.  Driveability-analyse indikerer, at det handler om nedbringning af en pæl. Den nuværende oversættelse i EC7-1 7.6.2.6 Stødbølgeanalyse er uheldig, da den kan forveksles med stødbølgemåling, som anvendes i forbindelse med PDA-målinger, og som indikerer, at der er målinger involveret – hvilket der ikke er.
[Low-Strain] Impact Integrity Tests	<b>Integritetstest</b>	Udføres med en håndholdt hammer (low strain).  Forsøget blev tidligere kaldet PIT-måling efter selve instrumentet (Pile Integrity Tester), men da nye metoder (CSL, TIP) vinder frem til integritetstest af borede pæle, anbefales integritetstest anvendt for forsøgstypen.

- 1) Reelt er der ikke noget, der hedder en PDA-måling, men da begrebet er meget udbredt og indforstået, er det valgt at anbefale at anvende termen PDA-måling som stødbølgemålingen i forbindelse med dynamisk prøvebelastning (high strain impact load test). Ligeledes er der heller ikke noget, der hedder PDA-analyser, men meningen er klar; det handler om analyse af en målt stødbølge med en PDA (PDA står for Pile Driving Analyser og er en beskyttet titel for et instrument, udviklet af Pile Dynamics Inc, som kan bruges til at analysere målte stødbølger).

### 3 FORUDSÆTNINGER FOR STØDBØLGEANALYSE

Da CAPWAP-analyser grundlæggende foregår ved en signal matching analyse, ligger det i metoden, at flere løsninger på fordelingen mellem overflade- og spidsmodstand og fordelingen af overflademodstanden langs pæleskafte kan give den samme Match Quality (MQ).

Flere af disse løsninger vil normalt give totale bæreevner i den rigtige størrelsesorden, mens fordelingen mellem overflade- og spidsmodstand og fordelingen af overflademodstanden langs pæleskafte kan være mere eller mindre plausibel i forhold til øvrige informationer fra geotekniske undersøgelser og installationsforløbet af pælen.

Som grundlag for at vurdere bæreevnen ved PDA-måling, og dermed løsningen til et plausibelt resultat for en CAPWAP-analyse, skal jordbundsforholdene være kendt jf. 7.5.3 i EC7-1. Der skal derfor som minimum foreligge følgende oplysninger:

- En geoteknisk undersøgelse, der mindst har omfang svarende til en parameterundersøgelse i henhold til EC7-1 og EC7-2 inkl. danske anekser, hvilket blandt andet vil sige, at boringerne/CPT'erne skal være tilstrækkeligt dybe til at belyse jordbundsforholdene under pælespids. Undersøgelsen afrapporteres i en undersøgelsesrapport. Eventuelt kan en datarapport være tilstrækkelig, hvis den indeholder alle nødvendige data. Rapporten skal indeholde en situationsplan, der viser placeringen af alle undersøgelsepunkter. Desuden skal rapporten indeholde boreprofiler og CPT-profiler for alle de udførte geotekniske boringer og CPT'er. Boringer bør være udført i henhold til anvisningerne i DGF Bulletin 14, og CPT'er skal være udført iht. DS/EN ISO 22476-1, mens jordartsbedømmelse og laboratorieforsøg bør være udført i henhold til DGF Bulletin 1 og 15. Bore-/CPT-profilerne skal indeholde alle udførte målinger, herunder vingestyrker (intakte og omrørte), N-værdier fra eventuelle SPT'er og tilstrækkelig belysning af niveauet for undersøgelsepunktens højdemæssige beliggenhed, f.eks. terrænkote ved boringer/CPT'er i et landsdækkende kotesystem.

- Pæleplan med placering af boringer og CPT'er.
- Ramejournal med fuldt rammeforløb for de pæle, hvorpå der skal udføres CAPWAP-analyser; med tydelig angivelse af pælenummer, pæledimension, type og materiale samt top- og spidskote. Desuden skal placeringen af eventuel asfaltering, kobling og skader angives for at undgå, at trækreflekser fra koblinger fejltolkes som skader på pælen.
- Borejournal for borede pæle med angivelse af pælenummer, udførelsesmetode, støbetidspunkt, dimension, top- og spidskote, betonstyrke samt armeringsforhold, da det kan have indflydelse på stødbølgens udbredelseshastighed. Desuden skal den anvendte betonmængde til udstøbning af pælene samt den teoretiske mængde oplyses med henblik på vurdering af eventuelle anomaliteter i pæletværnsnittet.

Følgende forhold i forbindelse med ramningen bør desuden være opfyldt:

- De generelle anbefalinger for ramning af præfabrikerede armerede betonpæle vedrørende forholdet mellem hammer- og pælevægt er angivet i DK NA. Det vil sige, at  $\eta \times h \leq \text{ca. } 1 \text{ m}$  og  $G_{\text{hammer}}/G_{\text{pæl}} \geq \text{ca. } 0,8$  bør være opfyldt. Disse retningslinjer er nyttige for både indramning og efterramning med PDA-måling og passer godt med praktiske erfaringer i forhold til at begrænse skader fra topknusning pga. høje trykspændinger. For at begrænse skader fra trækspændinger tilstræbes som tommelfingerregel desuden to cifrede tællinger, det vil sige mere end 10 slag pr. 20 cm nedsynkning.
- For at eftervise brudbæreevnen under efterramning med PDA-måling bør der tilstræbes 3-5 mm nedsynkning pr. slag. Hvis der ikke kan opnås ca. 3 mm nedsynkning pr. slag, må den målte værdi betragtes som en mobiliseret bæreevne, der er lavere end brudbæreevnen. Det anbefales, at der for rammede pæle anvendes mindst samme hammervægt ved PDA-måling som ved indramningen af pælen. For at sikre, at den ønskede testlast for borede pæle (ikke nødvendigvis brudlasten, men evt. en mindre på forhånd fastlagt last) kan eftervises ved PDA-måling, bør hammervægten være mellem 1-2% af eftervisningslasten. 1% vil normalt kun være tilstrækkelig på et meget stift bærelag (klippe),

mens 2% er den generelle anbefaling. Eftervisning af f.eks. 8 MN bæreevne på en (stor) boret pæl vil således kræve en faldlodsindretning på ca. 16 t.

CAPWAP-analysen kan principielt gennemføres uden at forholde sig til overstående informationer, men resultaterne af analysen risikerer ikke at være plausible i forhold til de aktuelle jordbundsforhold. Derfor bør PDA-målinger kun anvendes, hvor de geotekniske undersøgelser svarer til geoteknisk kategori 2 eller 3. I geoteknisk kategori 1, hvor jordbundsforholdene ikke nødvendigvis kendes til fuld dybde, kan PDA-målinger føre til en fejlvurdering af pælens endelige bæreevne.

Ved efterramning af borede pæle i forbindelse med PDA-målinger påvirkes pælen af trækspændinger, og borede pæle skal derfor forsynes med tilstrækkelig armering til at imødegå skadelige trækrevner.

For borede pæle betragtes det som ”best practice” mindst at udføre (low strain) integritetstest med hammermetoden før udførelse af (high strain) PDA-måling, da der hermed fås et første indtryk af pælens udformning. Integritetstesten kan indikere, om der f.eks. er indsnævring/udbulinger, om spidsen ligger i forventet dybde m.v. Integritetstesten kan ikke mobilisere overflade- og spidsmodstanden omkring pælen, så det er overvejende oplysninger om pælens geometri, man kan få ved

at lave integritetsmålingen (det målte low strain signal). Signalet fra integritetstesten kan derfor med fordel anvendes ved senere justeringer af pæleimpedansen i den efterfølgende CAPWAP-analyse.

## 4 CASE- OG CAPWAP-ANALYSE

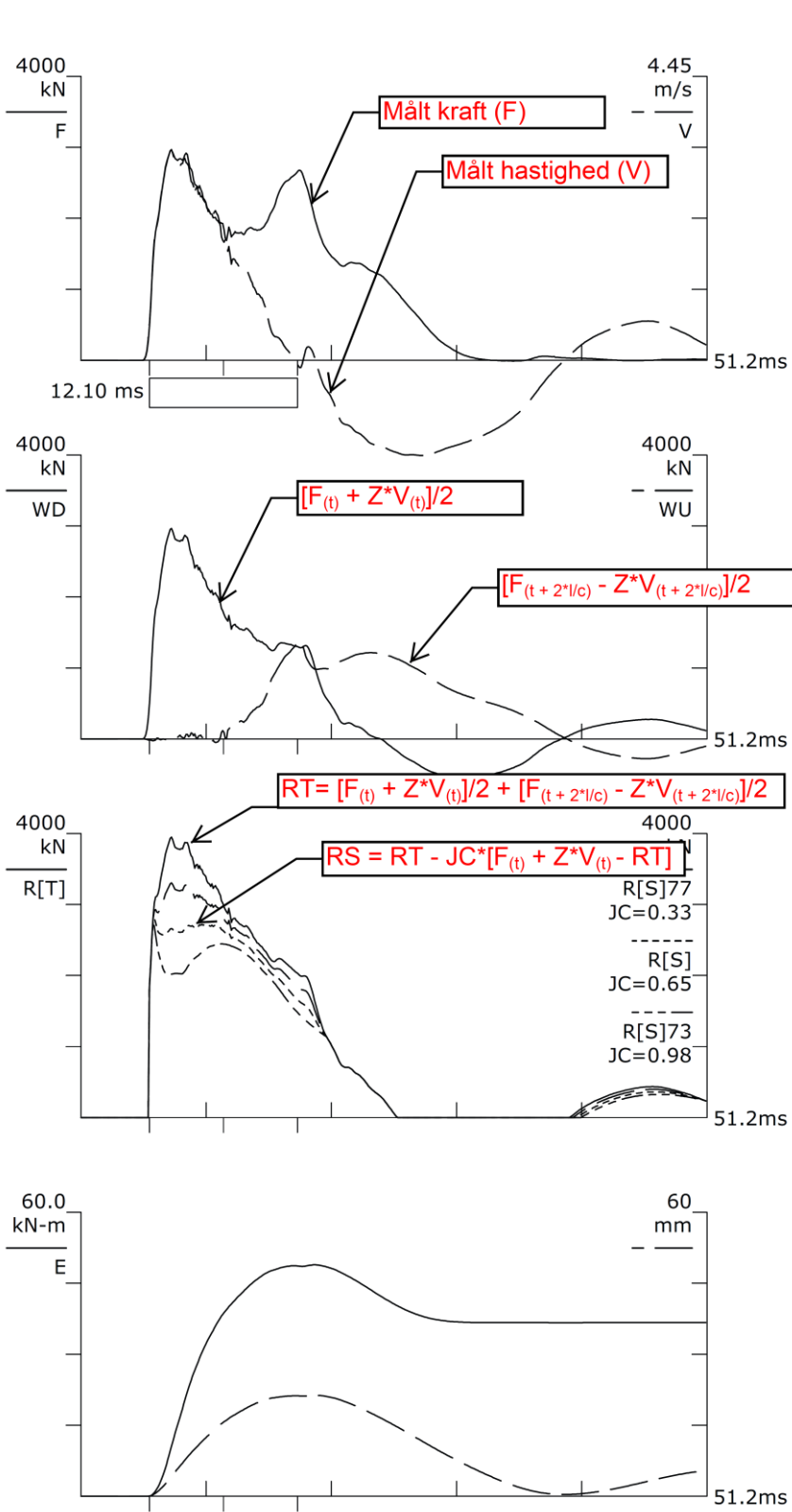
### 4.1 CASE-analyse

#### 4.1.1 Resultater

Resultaterne fra CASE-analysen præsenteres typisk med fire grafiske plot som vist i Figur 1. De fire grafer viser som funktion af tiden (ms):

- 1. graf viser målt kraft- (F) og hastighedskurve (V).
- 2. graf viser beregnet nedadgående stødbølge (WD) og reflekteret opadgående stødbølge (WU).
- 3. graf viser pælens modstand (R) udskrevet med forskellige dæmpningsfaktorer (JC).
- 4. graf viser den overførte energi til pælen (E) under slaget og pælehovedets nedsynkning.

De målte værdier og afledte størrelser, herunder bæreevnen, angives i tabellen øverst til højre på Figur 1. Forkortelserne fremgår af Tabel 2.



BN 14  
 dd-mm-åååå  
 RMX 2719 kN  
 EMX 48.9 kN-m  
 FMX 2958 kN  
 VMX 3.30 m/s  
 CSX 32.9 MPa  
 TSX 8.6 MPa  
 DMX 21 mm  
 DFN 3 mm  
 BTA 100.0 (%)

LE 24.4 m  
 AR 900.00 cm<sup>2</sup>  
 EM 40000 MPa  
 SP 24.5 kN/m<sup>3</sup>  
 WS 4001.4 m/s  
 EA/C 900 kN-s/m  
 LP 23.8 m

F34 A34

F3: [D721] 90.5 (1.02)  
 F4: [D729] 93 (1.02)  
 A3: [K1879] 355 mv/5000g's (1)  
 A4: [K2035] 350 mv/5000g's (1)

Figur 1 Eksempel på resultater fra CASE-analyse

Tabel 2 Forklaring på forkortelser på resultatbilag fra CASE-analyse

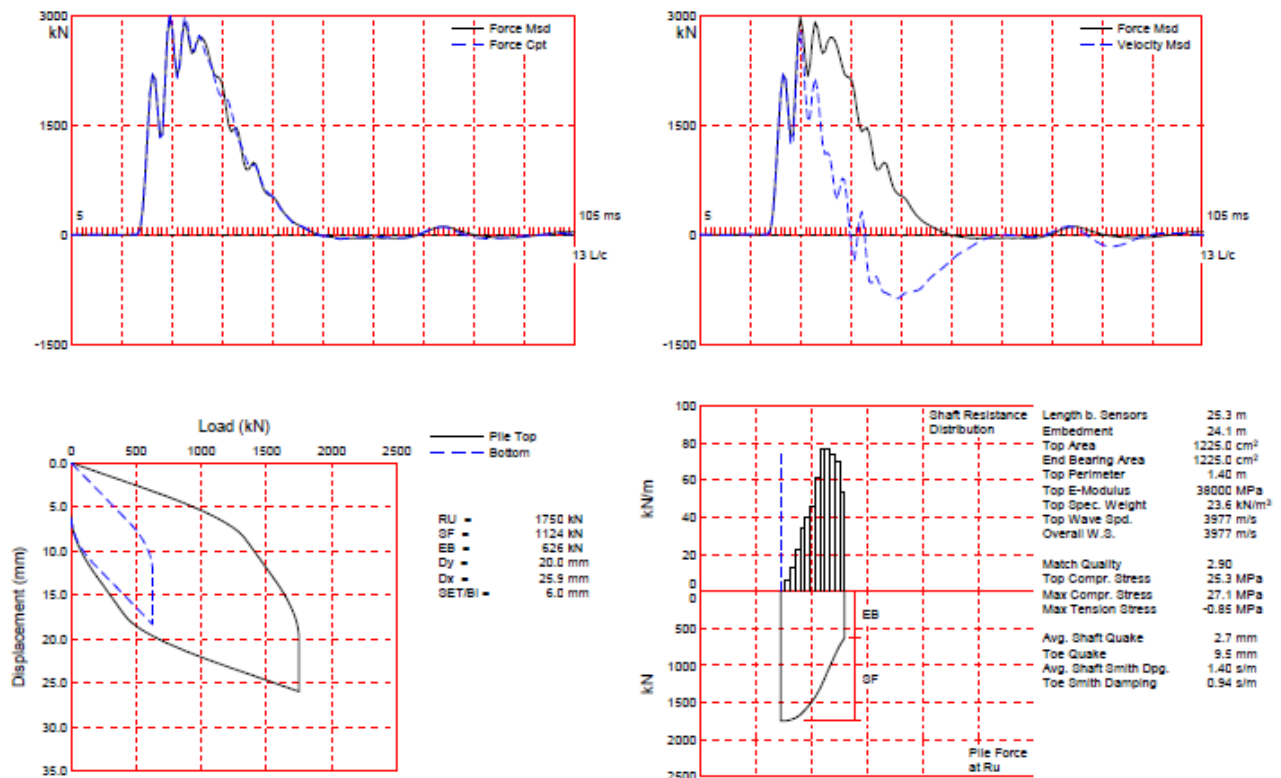
RMX	Pælebæreevne beregnet efter CASE metoden; maksimum målt under efterramningslaget (om det er en mobiliseret- eller brudværdi, afhænger af den blivende sætning pr. slag, se DFN nedenfor)
EMX	Maksimum af målt rammeenergi overført til pælen (ved transducerens placering)
FMX	Maksimum af målt trykkraft (ved transducerens placering)
VMX	Maksimum af målt hastighed (ved transducerens placering)
CSX	Maksimum af målt gennemsnitlig trykspænding (ved transducerens placering)
TSX	Maksimum af beregnet gennemsnitlig trækspænding (i pælen, under transducerens placering)
DMX	Maksimum af beregnet pæleflytning (inkl. midlertidig sammentrykning under efterramningslaget)
DFN	Blivende beregnet flytning af pælen (~ blivende sætning pr. slag)

BTA	Analyse af pæleintegritet. 100% svarer til intakt pæletværsnit under transducerens placering
LE	Pælens længde under transducerne (målelængden)
AR	Pælens tværsnitsareal
EM	Pælens E-modul
SP	Pælematerialets rumvægt
WS	Pælematerialets udbredelseshastighed (lyd)
EA/c	Pælematerialets impedans (afledt størrelse af følgende input: $EM \times AR / WS$ )
LP	Pælespidsens dybde under terræn

## 4.2 CAPWAP-analyse

### 4.2.1 Resultater

Resultaterne fra en CAPWAP-analyse vises typisk med fire grafiske plot og i en tabel som i nedenstående eksempel, se Figur 2 og Figur 3. Forkortelser fremgår af Tabel 3.



Figur 2 Eksempel på grafisk præsentation af resultater fra CAPWAP-analyse



- Øverste graf til venstre på Figur 2 viser overensstemmelse mellem målte (Force Msd) og beregnede (Force Cpt) kraftkurver.
- Øverste graf til højre viser kurver for målt kraft (Force Msd) og hastighed (Velocity Msd).
- Nederste graf til venstre viser last-sætningskurven fra en simuleret prøvebelastning baseret på parametrene fra CAPWAP-analysen.
- Nederste graf til højre viser kræfternes fordeling på pælens overflade (SF) og spids (EB). Pæletop er til venstre, pælespids er til højre.

*Tabel 3 Forklaring på forkortelser på resultatbilag fra CAPWAP-analyse*

L/c	Forhold mellem pælens målelængde (L) og hastighed af stødbølge (c)
Ru	Maksimum beregnet bæreevne (i Figur 2 repræsenterer Ru totalbæreevnen)
Rs	Maksimum beregnet overfladebæreevne
Rb	Maksimum beregnet spidsbæreevne
Dy	Maksimum simuleret blivende flytning af pæletop
Dx	Maksimum simuleret total flytning af pæletop

CAPWAP-analysen er en såkaldt signal matching analyse, altså en iterativ proces, hvor man søger at

opnå så god overensstemmelse som muligt mellem de målte (Msd) og beregnede (Cpt) kurver. Den afledte Match Quality (MQ) er en vægtet vurdering af den opnåede match. Man kan (bør) ikke opstille absolutte kriterier for, hvornår MQ er god nok; dog skal den helst være under 4.

Grafen nederst til højre på Figur 2, som viser fordelingen af overflademodstanden langs med pælen og spidsmodstanden, vurderes at være den af størst interesse for den typiske bruger af CAPWAP-resultater, da den giver et grafisk overblik over analyseresultatet.

Ved udledning af de endelige bæreevner kan resultaterne fra en CAPWAP-analyse præsenteres i en mere detaljeret tabeloversigt som vist i Figur 3, hvor de indrammede tal/kolonner typisk vil være de mest relevante værdier, men de skal ses i sammenhæng med øvrige faktorer, der kan have indflydelse på bæreevnen af pælen (se afsnit 3). I figuren er der med forskellige farvekoder angivet, hvor man på udskriften finder oplysninger om totalbæreevne (gult), total overflademodstand (grønt), spidsmodstand (blåt), fordelingen af overflademodstanden langs med pælen pr. lbm. pæl (venstre grønne ramme), og som enhedsoverflademodstand (højre grønne ramme) samt spidsenhedsmodstand (blå ramme). Den røde kolonne angiver dybden (interval) under terræn ved pælen, hvor de angivne bæreevner optræder.

CAPWAP SUMMARY RESULTS										
<b>Total CAPWAP Capacity:</b>		<b>2727.2;</b>		<b>along Shaft</b>		<b>2199.4;</b>		<b>at Toe</b>		<b>527.8 kN</b>
Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm	
				<b>2727.2</b>						
1	2.0	1.4	8.2	2719.0	8.2	5.72	4.77	0.666	2.000	
2	4.1	3.5	15.8	2703.2	24.0	7.77	6.48	0.666	2.000	
3	6.1	5.5	10.5	2692.7	34.5	5.16	4.30	0.666	4.000	
4	8.1	7.5	10.5	2682.2	45.0	5.16	4.30	0.666	4.000	
5	10.2	9.6	35.4	2646.8	80.4	17.41	14.51	0.666	4.000	
6	12.2	11.6	45.8	2601.0	126.2	22.52	18.77	0.666	3.000	
7	14.2	13.6	86.2	2514.8	212.4	42.39	35.33	0.666	8.000	
8	16.3	15.7	274.2	2240.6	486.6	134.85	112.38	0.666	6.000	
9	18.3	17.7	499.5	1741.1	986.1	245.66	204.71	0.666	5.000	
10	20.3	19.7	485.9	1255.2	1472.0	238.97	199.14	0.666	6.000	
11	22.4	21.8	403.0	852.2	1875.0	198.20	165.16	0.666	7.000	
12	24.4	23.8	324.4	527.8	2199.4	159.54	132.95	0.666	7.000	
Avg. Shaft			183.3			92.41	77.01	0.666	6.025	
Toe			527.8				5864.44	0.080	6.408	
Soil Model Parameters/Extensions						Shaft	Toe			
Case Damping Factor						1.627	0.047			
Reloading Level			(% of Ru)			100	100			
Unloading Level			(% of Ru)			66				
Soil Plug Weight			(kN)				2.43			
CAPWAP match quality						=	2.81	(Wave Up Match); RSA = 0		
Observed: final set						=	3.000 mm;	blow count = 333 b/m		
Computed: final set						=	2.895 mm;	blow count = 345 b/m		
max. Top Comp. Stress						=	32.69 MPa	(T= 17.6 ms, max= 1.193 x Top)		
max. Comp. Stress						=	39.01 MPa	(Z= 16.3 m, T= 22.6 ms)		
max. Tens. Stress						=	-5.5 MPa	(Z= 16.3 m, T= 48.4 ms)		
max. Energy (EMX)						=	48.15 kJ;	max. Measured Top Displ. (DMX)=21.31 mm		

Figur 3 Eksempel på resultater fra CAPWAP-analyse af 30x30 cm pæl

#### 4.2.2 Brug af CAPWAP-resultater

Fordelingen af overflademodstand på de enkelte pælestykker kan variere, men med CAPWAP-analysen kan man få et godt bud på fordelingen. Det er dog vigtigt, at man forholder sig til resultaterne, og specielt omkring den/de nederste meter af pælen kan fordelingen af bæreevnen flyttes mellem spids og overflade, uden at det betyder ret meget for Match Quality og den totale bæreevne i CAPWAP-analysen. Den angivne overfladebæreevne i de nederste lag kan derfor være mere usikker end for den øvrige del af pælen.

I forbindelse med vurdering af overflademodstanden i de sætningsgivende lag ud fra resultaterne i

CAPWAP-analysen bør der anvendes en øvre karakteristisk værdi i forbindelse med beregning af negativ overflademodstand. Virkningen af asfaltering slår normalt ikke igennem ved den hurtige belastning, der sker ved en stødbølgemåling. Derfor kan de udledte værdier af overflademodstanden fra CAPWAP-resultaterne også reduceres som følge af asfaltering. Dog skal der tages hensyn til regenerationsforløbet af styrkerne i sætningsgivende lag. Det vil sige, at hvis PDA-målingen udføres for tidligt efter indramningen, risikeres en undervurdering af den negative overflademodstand. Der bør ikke anvendes værdier under 10 kN/m<sup>2</sup> pæleoverflade jf. DK NA, L.3(4).

For eftervisning af træk bæreevner ud fra PDA-målinger (tolket ved hjælp af CAPWAP-analyser)

tilrådes det at udføre projektspecifikke korrelationer mellem statiske trækforsøg og resultater for overflademodstand (tryk) bestemt ved PDA-målinger.

Resultater fra PDA-målinger, forberedt af erfarne operatører, viser god korrelation til statiske prøvebelastninger, primært på totalbæreevner, sekundært når det gælder størrelsen og fordelingen af overflademodstand og spidsmodstand.

PDA-målinger anbefales udført på pæl(e) med samme spidskote som planlagt for produktionspælene, da det er nærmest umuligt at vurdere spidsmodstanden i et højere eller lavere niveau, end det målte.

Når CAPWAP-analyserne foreligger, skal den projekterende fastlægge de endelige karakteristiske og regningsmæssige pælebæreevner ved at sammenholde alle de foreliggende oplysninger, herunder resultatet af den enkelte CAPWAP-analyse, de omkringliggende CAPWAP-analyser, variation i jordbundsforhold, rammemodstande, borejournaler, geostatistiske beregninger og vurdering af negativ overflademodstand.

## 5 PDA-MÅLINGER PÅ RAMMEDE PÆLE

### 5.1 Anvendelsesområde

Overordnet er det tilladeligt og brugbart at udføre PDA-målinger på rammede pæle i både friktionsjord og kohæsionsjord; dog er der visse ting, der skal tages hensyn til ved den efterfølgende fastlæggelse af bæreevnen på baggrund af PDA-målingerne.

PDA-målinger på rammede pæle kan bruges til:

- Vurdering af pælematerialespændinger under ramning.
- Vurdering af pælens integritet; dvs. er pælen blevet beskadiget, f.eks. under installationen.
- Vurdering af pælens bæreevne fordelt på overfladebæreevne og spidsbæreevne som beskrevet i de tidligere afsnit.
- Vurdering af pælens bæreevneudvikling over tid ved gentagne målinger jf. DK NA, A.3.2.4.

Behandling og tolkning af resultaterne er gennemgået i den første del af nærværende vejledning,

hvorfor der generelt henvises til disse afsnit for brug og tolkning af målingsresultaterne.

Et uventet respons fra en impedansreduktion vil for præfabrikerede betonpæle eller stål pæle, som sædvanligvis har veldefinerede materialeparametre, ofte skyldes revner, anden beskadigelse eller en knækket pæl. Der bør i disse tilfælde udføres supplerende tiltag til at sikre, at pælen har tilstrækkelig bæreevne/styrke til at kunne optage belastningen, alternativt må der rammes en erstatningspæl.

### 5.2 Hensyntagen til jordbundsforhold og valg af tidspunkt for PDA-måling

Ved vurdering af pæles bæreevne ved hjælp af PDA-målinger kan det være afgørende for resultatet, hvor lang tid der går, fra pælen er rammet, til PDA-målingen udføres. Ved PDA-målinger er det bæreevnen på det aktuelle tidspunkt for målingen, der måles. Når pælene er rammet i ler, sker der over tid en regeneration af styrken, og derved kan den målte bæreevne øges betydeligt over tid, mens der for pæle i sand normalt ikke sker særlig stor forøgelse af bæreevnen, medmindre rammemodstanden (bæreevnen) er blevet undervurderet på grund af f.eks. porevandsovertryk.

Hvis der opbygges porevandsovertryk under ramning eller efterramning, vil det generelt reducere rammemodstanden og føre til en undervurdering af denne; hvad enten den vurderes ved hjælp af Den Danske Rammeformel eller PDA-måling. Dette forhold vil typisk optræde i finkornede materialer, hvor der eksempelvis er fint sand eller silt i jordprofilet ved pælespids og/eller langs pælen.

Hvis formålet med at udføre PDA-måling er at verificere rammede pæles brudbæreevne, er det derfor vigtigt at tillade en vis ventetid mellem indramning og efterramning med PDA-måling, så et evt. porevandsovertryk ved finkornede jordarter kan nå at dræne væk, og at kohæsionsjord kan nå at regenerere mest muligt.

Generelt kræver friktionsjord kortere ventetid (fra < 1 dag). Ved voksende indhold af finkornet materiale bør ventetiden øges. I kohæsionsjord vil en ventetid på en uge ofte være et rimeligt kompromis mellem projektfremdrift og nyttiggørelse af eftervist regenerering af overfladebæreevnen. Længere ventetid er fordelagtig, hvis projektet til-

lader det. Normalt antages det, at en pæl i ler opnår den geostatisk beregnede bæreevne efter 4 uger, men dette kan dog variere afhængig af både styrker og lerets karakteristika. Det kan for faste lere være vanskeligere at eftervise den geostatisk beregnede bæreevne efter kort tid, da regenerationen ofte er langsommere for ler med høje forskydningsstyrker. For plastisk ler er regenerationen ofte hurtigere end i moræneler med tilsvarende høje styrker, men der kan også være betydelig variation i regenerationshastigheden i plastisk ler.

I blandingsjord og i lagdelt jord må ventetiden skønnes ud fra en konkret vurdering af det aktuelle jordprofil, og det må overvejes, i hvor høj grad eventuelle lerlag vil kunne give anledning til øgning af bæreevnen over tid.

Når pæle rammes i kalk, ødelægges kalkens struktur, og dele af kalken kan blive som silt. Bæreevnen af pæle i kalk kan variere meget og afhænger af kalkens egenskaber; i nogle tilfælde vil overflademodstanden kun være ca. 20-30 kPa, mens den i andre kan blive over 100 kPa. Spidsmodstanden kan ligeledes variere. Der kan for pæle i kalk i nogle tilfælde opnås en forøgelse af bæreevnen over tid, mens der i andre tilfælde ikke vil ske forøgelse af bæreevnen (gælder både overflade- og spidsmodstand).

Hvis tidseffekter ønskes taget i regning, skal anvisningerne i DK NA, A.3.2.4 følges.

### 5.3 Vurdering af trækbæreevne

Som vist i Figur 3 giver CAPWAP-analysen grundlag for at vurdere fordelingen mellem overflade- og spidsmodstand samt fordelingen af overflademodstanden langs med pælen. DK NA giver dog ikke retningslinjer for vurdering af trækbæreevner ud fra CAPWAP-analyser. En sådan vurdering, hvis den alligevel foretages, må derfor tage hensyn til, at overflademodstanden langs pælen bestemt ud fra en CAPWAP-analyse hidrører fra en trykbelastning. Ved trækbelastning kan overflademodstanden være lavere end målt ved PDA; hvor meget lavere må vurderes ud fra sammenlignelige statiske trækforsøg eller dokumenterede erfaringsværdier.

## 6 PDA-MÅLINGER PÅ BOREDE PÆLE

### 6.1 Anvendelsesområde

Overordnet er det tilladeligt og brugbart at udføre PDA-målinger på borede pæle i både friktionsjord og kohæsionsjord; dog er der visse ting, der skal tages hensyn til ved den efterfølgende fastlæggelse af bæreevnen på baggrund af PDA-målingerne.

PDA-målinger for borede pæle kan bruges til:

- Vurdering af pælens integritet, herunder om der er indsnævninger/udposninger på pælen, om pælen er udstøbt med en ensartet beton, eller om der er revner, som er opstået under installationen f.eks. som følge af, at hurtighærdende beton er blevet forstyrret under trækning af foringsrør.
- Vurdering af pælens bæreevne fordelt på overfladebæreevne og spidsbæreevne som beskrevet i de tidligere afsnit.
- Vurdering af pælens bæreevneudvikling over tid ved gentagne målinger jf. DK-NA A.3.2.4.

Som beskrevet i afsnit 3 bør der udføres en integritetsmåling (low strain) forud for PDA-målingen (high strain), idet signalet fra integritetsmålingen kan anvendes ved evt. senere justering af pæleimpedansen i CAPWAP-analysen.

### 6.2 Vurdering af pælebæreevne

For at kunne bruge PDA-målinger til bestemmelse af en boret pæls bæreevne er det nødvendigt, at der ved slaget opnås en blivende sætning af pælen. Dette kan dog være en stor udfordring, idet en boret pæl ofte er større end rammede præfabrikerede pæle, og det derfor kræver væsentligt større udstyr/energi for at opnå en flytning af pælen.

En boret pæl har, i modsætning til en præfabrikeret pæl, en mere ujævn overflade og ikke nødvendigvis et konstant tværsnit (udposning/indsnævring), hvilket medfører, at responset fra overflademodstanden kan være væsentligt sværere at tolke. Responset kan desuden være påvirket af uensartet beton i den borede pæls tværsnit (bleeding eller tilsvarende).

Der foreligger i Danmark ikke mange projekter, hvor der både er udført PDA-målinger og statiske

prøvebelastninger på borede pæle. Resultaterne af de forsøg, der er udført, tyder dog på, at pælens samlede målte trykbæreevne ved udførelse af en CAPWAP-analyse rimeligvis giver samme resultater som målt ved de statiske prøvebelastninger.

Som vist i Figur 3 giver CAPWAP-analysen grundlag for at vurdere fordelingen mellem overflade- og spidsmodstand samt fordelingen af overflademodstanden langs med pælen. DK NA giver dog ikke retningslinjer for vurdering af træk bæreevner ud fra CAPWAP-analyser. En sådan vurdering, hvis den alligevel foretages, må derfor tage hensyn til, at overflademodstanden langs pælen bestemt ud fra en CAPWAP-analyse hidrører fra en trykbelastning. Ved trækbelastning kan overflademodstanden være lavere end målt ved PDA; hvor meget lavere må vurderes ud fra sammenlignelige statiske trækforsøg eller dokumenterede erfaringsværdier.

Resultaterne af de sammenligninger, der findes mellem beregnet overfladebæreevne bestemt ved CAPWAP-analyse og statiske trækforsøg, indikerer på det meget begrænsede grundlag, at træk bæreevnen af borede pæle bestemt ved CAPWAP-analyse er behæftet med stor usikkerhed.

Eftersom der på nuværende tidspunkt ikke findes en dansk database, hvor resultater af PDA-målinger er sammenholdt med resultater af statiske prøvebelastninger, og som følge af et begrænset erfaringsgrundlag må der – specielt, hvor resultaterne divergerer – altid anvendes et forsigtighedsprincip ved vurdering af borede pæles bæreevne.

## 7 NORMMÆSSIG BEHANDLING

I DK NA annek A.3.2.2 og A.3.2.3 er angivet retningslinjer for udledning af karakteristiske værdier ud fra jordparametre (geostatisk beregning for pæle i ler og evt. kalk) bestemt ved geotekniske undersøgelser og ud fra rammemodstand (typisk pæle i sand).

For pæle, hvor bæreevnen bestemmes ud fra geostatisk beregning, er angivet en korrelationsfaktor,  $\xi = 1,25$  for den betragtede pæl, der desuden er analyseret ved stødbølgemålinger, som støtter den geostatiske beregning, og  $\xi = 1,4$  for de pæle, hvor stødbølgemålingen er repræsentativ i relation til bl.a. pæledimension, installationsmetode og jordbundsforhold.

For pæle, hvor bæreevnen bestemmes ud fra rammemodstand (typisk pæle i sand), angives en korrelationsfaktor,  $\xi = 1,25$  for den betragtede pæl, der desuden er analyseret ved stødbølgemålinger, og  $\xi = 1,4$  for de pæle, hvor stødbølgemålingen er repræsentativ i relation til bl.a. pæledimension, installationsmetode og jordbundsforhold.

Det ses, at korrelationsfaktoren alene afhænger af, om man betragter den enkelte testede pæl eller de (produktions)pæle, som den testede pæl kan antages at være repræsentativ for.

Tilbage står således at konkretisere det kvalitative begreb ”repræsentativ”. I DK NA angives bl.a. pæledimension, installationsmetode og jordbundsforhold som karakteristika, der anvendes til at vurdere, om en pæl er repræsentativ for produktionspælene. I det følgende kommenteres disse krav:

- Parameteren pæledimension er formodentlig den enkleste at forholde sig til; en 25cm×25cm pæl kan således ikke betragtes som repræsentativ for en 40cm×40cm, og implicit må det gælde, at pælemateriale, pælegeometri (f.eks. stor/lille fortrængning), længde og dermed installationsdybde under terræn også skal vurderes i sammenhæng med jordbundsforholdene.
- Parameteren installationsmetode er også ret entydig, da der tydeligt kan skelnes mellem, om pælen er nedbragt ved ramning, vibrering, presning eller boring. Blandt disse tydeligt forskellige hovedkategorier vil der dog også kunne identificeres interne variationer som f.eks. anvendelse af forskellige pælehamre eller boring af pæle, evt. med hel- eller delfortrængning.
- Inddragelse af jordbundsforhold i vurderingen af, om en pæl er repræsentativ, er formodentlig det sværeste at forholde sig til. I DK NA er der ikke givet et specifikt antal eller procentdel af pæle, der skal testes, for at kunne afgøre, om de testede pæle er repræsentative for et givet område, og det derved er muligt at nedsætte korrelationsfaktoren  $\xi$  fra 1,5 til 1,4 for produktionspælene. Det er derimod afgørende, at der foretages en ingeniørmæssig vurdering af alle forhold, der har betydning for udledningen af bæreevnen af pælene.
- For at pæle kan være repræsentative inden for et givent område, skal jordbundsforholdene så-

ledes være belyst i byggefeltet i et sådant omfang, at variationer i f.eks. geologi, jordtyper (fyld, blødbund, ler, silt, sand, grus, kalk mm.), dybde til overside bæredygtige lag, styrkemæssige forhold/variationer i jordlagene til under pælespids, vandspejlsforhold (herunder også grundvandssænkning), terrænforhold, udgravning (aflastning) og evt. betydning af forbelastning mm. er velbelyste og kan afgrænses i byggefeltet.

- De geotekniske forundersøgelser skal derfor være udført i henhold til anbefalingerne i normen (DS/EN 1997-2 + AC, Anneks B) bl.a. med hensyn til dybde og afstand mellem undersøgelsespunkter.
- På byggefelter, hvor variationen i jordbundsforholdene er betydelig, skal der således være udført undersøgelser med mindre afstand mellem undersøgelsespunkterne, end hvor der er ensartede jordbundsforhold, ligesom antallet af prøvepæle også skal afspejle den større variation.
- Ved placeringen af prøvepæle skal der tages hensyn til ovennævnte forhold, og prøvepæle skal også placeres, hvor jordbundsforholdene er belyste; dvs. tæt ved undersøgelsespunkter, således at jordbundsforholdene kan sammenholdes med PDA-målingerne.
- Anbefalinger mht. valg af antal prøvepæle fremgår af DK NA, L.4 (2).
- Ved udvælgelsen af pæle, hvorpå der udføres PDA-målinger, skal indramningsforløbet/modstanden også indgå i vurderingen af, om pælene er repræsentative. Det kan være nødvendigt at udføre supplerende PDA-målinger, hvis resultaterne er meget varierende eller afviger betydeligt fra det forventede.

For skråpæle afviger udstrækningen af pælens længde i de forskellige jordlag fra lodpælens, ligesom pælespidsniveauet også kan afvige, og det kan derfor være nødvendigt at udføre særskilte stødbølgemålinger på skråpæle.

I de tilfælde, hvor den beregnede pælemodstand udledt ved geostatisk beregning eller målt rammemodstand beregnet ud fra Den Danske Rammeformel viser sig at afvige væsentligt fra det tilsvarende resultat fra PDA-målingen, skal den projek-

terende sammenholde alle de foreliggende oplysninger og på baggrund heraf fastlægge de endelige karakteristiske og regningsmæssige pælebæreevner.

Pæle kan rammes i geoteknisk kategori 1, hvis der er tale om let byggeri (se definitionerne om geotekniske kategorier i DK NA), og pælespidsen er rammet under de sætningsgivende lag. Med henvisning til afsnit 3, kan resultaterne af PDA-målingerne føre til fejlvurderinger, når jordbundsforholdene ikke er kendte til under pælespids, og derfor bør PDA-målinger kun udføres, hvor bundforholdene er kendte til under pælespids, dvs. hvor der er udført undersøgelser svarende til geoteknisk kategori 2 eller 3. Hvis pæle rammes i geoteknisk kategori 1, skal partialkoefficienterne, jf. DK NA A.3 (6)P, multipliceres med en modelfaktor  $\gamma_s = 1,25$ , det vil sige, at  $\gamma_R = 1,25 \cdot 1,3 = 1,625$ , og herudover skal korrelationsfaktoren  $\xi$  sættes = 1,5.

## 8 LITTERATURLISTE

Rausche, F., Nagy, M. and Likins, J. (2008) Mastering the art of pile testing. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles. Lisbon, Portugal. Ed. J.A. dos Santos. pp19-32.

Viana da Fonseca, Santos, A (2008) International Prediction Event Behaviour of CFA, Driven and Bored Piles in Residual Soil Experimental Site.

## 9 BIDRAGSYDERE TIL UDARBEJDELSE AF VEJLEDNINGEN

Denne vejledning er udarbejdet af Pælekomiteen under Dansk Geoteknisk Forening med nedenstående bidragsydere:

Thomas Gribsholt-Beck, Niras  
 Jesper Bue, Geo  
 Per Grud, CP Test  
 Karen Furbo Rasmussen, Geo  
 Morten Rasmussen, Atkins  
 Anders Tovsig Andersen, Aarsleff  
 Marianne Bondo Hoff  
 Lars G. Christensen, Centrum Pæle  
 Kenny Kataoka Sørensen, Aarhus Universitet  
 Jakob Rahbek Udengaard, Aarsleff  
 Ole Møller, Aarsleff

## BILAG 1

### ENGELSKE TERMER OG EKSEMPLER PÅ DERES ANVENDELSE

Dynamiske belastningsforsøg er udviklet i USA, og diverse benævnelser og termer er derfor oprindeligt engelske. Nedenfor er angivet relevante US/UK English termer fra forskellige kilder og kommentarer til deres betydning.

#### ASTM D4945, Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles

I DS/EN 1997-1, afsnit 7.5.3, henvises til ASTM D4945.

- I ASTM D4945 benævnes metoden i overskriften *High-Strain Dynamic Testing of Piles*, og der refereres til High-Strain Dynamic Tests.
- Disse udføres ved hjælp *The Dynamic Measurement Apparatus*, f.eks. udrustet med *externally mounted transducers (accelerometers and strain transducers)*, der enten via kabel eller radiosignal overfører de målte signaler til *apparatus for recording, processing and displaying the data*. ASTM D4945-17 bruger således ikke benævnelsen PDA, som er en forkortelse for *Pile Driving Analyser*, der er et registreret varemærke fra PDI (Pile Dynamics Inc.). (Ligesom en Hoover = støvsuger, eller Wellingtons = gummistøvler i England).
- Analysemetoder omtales kun i forhold til rapportering, hvor det anføres at: *to estimate as appropriate the overall magnitude of the dynamic and static axial compressive capacity mobilized at the time of testing, the distribution of the dynamic and static axial compressive capacity along the pile length, and the engineering properties of the pile and the soil or rock adjacent to the pile as used in the interpretation*. CASE- eller CAPWAP-metode omtales ikke direkte, men de beskrevne resultater kan kun leveres ved at anvende en eller begge analyseformer.

#### DS/EN ISO 22477-4:2018, Part 4: Testing of Piles: Dynamic Load Testing

- I afsnit 1, Scope, tydeliggøres standardens relation til DS/EN 1997-1 i følgende passus: *This document outlines the methods of testing required to allow assessment of pile resistance to be determined from the following methods and procedures described in EN1997-1:2004+A1:2013*.
- Termen *dynamic load test* (afsnit 3.1.7) anvendes generelt om en test, hvor en pæl undergår belastning med en dynamisk påvirkning på pæletoppen for at bestemme dens trykbæreevne.
- Termen *dynamic impact test* (afsnit 3.1.8) anvendes specifikt om en test, hvor der foregår samtidig måling af tøjning, acceleration og sætning som funktion af tiden under slaget.
- Annex B omhandler *wave equation analysis* og tydeliggør, at: *wave equation analysis is based on a mathematical model which simulates the impacting hammer and associated components, the pile components, the stress wave propagation in a pile and the behavior of the ground*.
- Annex D omhandler *evaluation by closed form solutions using empirical damping values* og viser i afsnit D.3.1, hvordan en sådan foretages med CASE-metoden, og viser ligeledes et beregningseksempel.
- Afsnit E omhandler *evaluation of the measurement by signal matching* og forklarer modelopbygning og signal matching processen. I afsnit E.6 understreges, at *sensitivity of the signal matching and comparison to geotechnical investigation information* skal kontrolleres og sammenlignes.

**Pile Dynamics, Inc., PDI, [www.pile.com](http://www.pile.com)**

PDI har på deres hjemmeside en *SAMPLE SPECIFICATION for HIGH STRAIN DYNAMIC TESTING of DRIVEN PILES*, som naturligvis er præget af deres produkter og produktnavne, men det er et godt sted at finde information om de oprindelige engelske termer:

- *PDA: The dynamic monitoring shall be performed using a Pile Driving Analyzer<sup>®</sup> system (Model 8G or PAX). All equipment necessary for the dynamic monitoring such as sensors, cables or wireless transmitters, etc., shall be furnished by the Dynamic Testing Consultant. The equipment shall conform to the requirements of ASTM D-4945.*
- *Wave Equation Analysis: The wave equation analysis (using GRLWEAP software by Pile Dynamics, Inc. or equivalent) shall be used to assess the ability of the proposed driving system to install the pile to the required capacity and desired penetration depth within the allowable driving stresses.*
- *CAPWAP: Signal matching analysis (by CAPWAP<sup>®</sup> software, available from Pile Dynamics, Inc) of the dynamic pile testing data shall be performed on data obtained from the end of initial driving and the beginning of restrrike of xx% of the indicator piles ... CAPWAP is the industry state-of-practice tool to establish the pile capacity and extensive studies have been performed (Likins, G. E., Rausche, F., August 2004. Correlation of CAPWAP with Static Load Tests. Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles 2004: Petaling Jaya, Selangor, Malaysia; 153-165. Keynote Lecture).*

**Federation of Piling Specialists: Handbook on Pile Load Testing (2006), [www.fps.org.uk](http://www.fps.org.uk)**

I håndbogen findes følgende beskrivelse af begreberne CASE og CAPWAP/SIMBAT:

- *Two types of analysis of the field data are possible, CASE<sup>®</sup> and CAPWAP<sup>®</sup>/SIMBAT<sup>®</sup>.*
- *CASE<sup>®</sup> analysis calculates the dynamic resistance of the soil and using an empirical damping factor relates this to the static resistance. The value of the damping factor can be determined from the soil type at the pile toe to provide an early indication of soil resistance on site at the time of testing, or back-analysed from the stress wave analysis to determine a site specific value for sites with a reasonably consistent soil profile. CASE<sup>®</sup> analysis is more suited to end bearing piles than friction piles.*
- *CAPWAP<sup>®</sup>/SIMBAT<sup>®</sup> analysis involves the manipulation of several variables in the program to obtain the best match between the force and velocity traces of the measured and computed stress wave. These variables are static resistance, soil damping and soil elasticity or quake, each being adjusted on the shaft and the toe of the pile.*
- *Whereas CASE<sup>®</sup> analysis will only predict total mobilised soil resistance, CAPWAP<sup>®</sup>/SIMBAT<sup>®</sup> stress wave analysis will proportion this resistance between shaft friction and end bearing, as well as providing a predicted immediate load deflection curve.*