

Referenceblad for statiske pladebelastningsforsøg

Dansk Geoteknisk Forenings Feltkomité

April 2005

1. INDLEDNING

Pladebelastningsforsøg udføres hovedsageligt for at bestemme jordens deformationsegenskaber. Desuden er det også muligt at bestemme brudegenskaberne ved forsøg med store belastningsintensiteter.

Pladebelastningsforsøg udføres normalt på intakt jord i marken. Inden for vejbygning anvendes forsøget til at bestemme de elastiske egenskaber af underbunden og de forskellige lag i overbygningen under udførelsen eller på slidlaget på en eksisterende vej.

2. Udstyr

Udstyret består af:

- modholdsarrangement
- donkraft eller spindel
- kraftmåler
- plade
- flytningsmåler
- registreringsudstyr.

De enkelte dele beskrives i det følgende:

Modholdsarrangementet kan bestå af en opstilling med dødvægte, der hviler på et vandret, H-formet arrangement af stålbjælker (hvor nedpresningen foretages under tværbjælken). En anden mulighed er at benytte en ballasteret forsøgsbil. Bilen bør hæves fra jorden med donkrafte, da bilens fjedre og dæk ellers kan vanskeliggøre styringen af pladens nedpresning.

Donkraften kan både styres manuelt eller med en servostyret hydraulikpumpe. Alternativt kan det ved langtidsforsøg være en fordel at benytte en elektrisk drevet spindel. Hvis der anvendes elektronisk registrering, kan spindelen eventuelt styres ved tilbagekobling til krafttransducere.

Kraften på pladen kan måles ved:

- en elektronisk krafttransducer
- en mekanisk kraftring (fjederelement af stål med et måleur)
- olietrykket, hvis der benyttes en donkraft.

Sidstnævnte metode kan give anledning til en afvigelse op til 20%, idet en del af den registrerede kraft kan hidrøre fra friktionskræfter i donkraften.

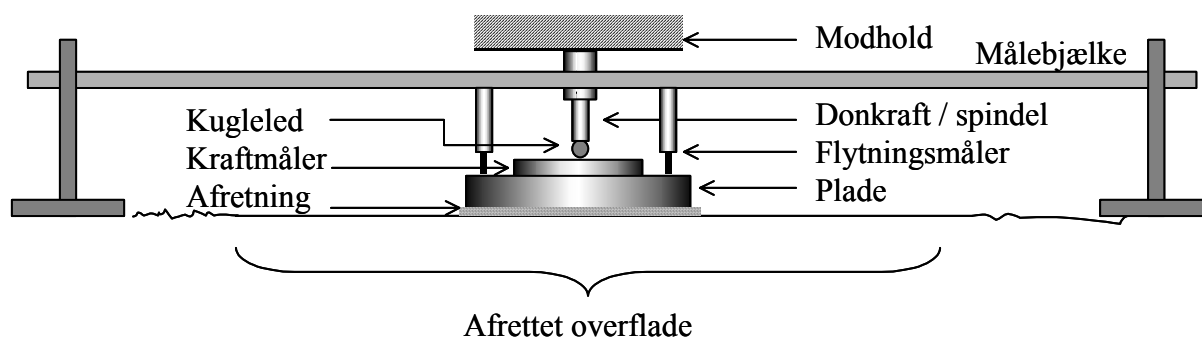


Fig. 1. Eksempel på forsøgsopstilling

Pladebelastningsforsøg udføres sædvanligvis med cirkulære plader med diametre i intervallet 0,2 - 1,0 m. Forsøgsopstillingen er vist på figur 1.

Der anvendes en stiv plade til geotekniske pladebelastningsforsøg. Ved de store pladediametre sikres stivheden ved at lægge plader med mindre diametre ovenpå. Vejtekniske forsøg kan udføres ved at benytte en fleksibel plade bestående af en stålskive beklædt med en skumgummiskive med samme diameter og en tykkelse på ca. 25 mm. Det skal i alle tilfælde sikres, at pladen belastes med en central kraft ved at indskyde et kugleled over pladen (eller over målecellen).

Den lodrette flytning registreres med måleure eller elektriske flytningsmålere (LVDT). Flytningen registreres i forhold til en vandret, ubelastet målebjelke som understøttes udenfor den afrettede overflade. Målebjelken skal afskærms mod direkte sollys, fx med en udspændt presenning eller lignende. For en stiv plade måles nedsynkningen i 2-3 punkter jævnt fordelt på en cirkel koncentrisk med pladens periferi. For den fleksible plade måles nedsynkningen på den intakte jordoverflade gennem et centralt hul i pladen. Kraften påføres i dette tilfælde oversiden af pladen i en række punkter uden for centrum.

Registreringen af data fra forsøget kan enten foretages manuelt eller ved hjælp af en computerstyret datalogger (med elektriske kraft- og flytningsmålere). Alle relevante oplysninger om forsøget og resultater i form af arbejdskurver og beregnede elasticitetsmoduler m.v. kan da genereres automatisk, når forsøget er udført. Det er ligeledes enkelt at optegne tidskurver for de afsnit af forsøget, hvor kraften har været konstant.

3. UDFØRELSE

3.1 Generelt

Forsøgsarealet planeres i en afstand af 3-5 pladeradier (5 radier ved friktionsjord og 3 radier ved kohæsionsjord) målt fra centrum. Målebjelkens understøtning skal placeres uden for det planerede område. Modholdsarrangementet bør ligeledes understøttes udenfor det afrettede område. Det skal sikres, at overfladen af jorden ikke er frosset, udtørret, opblødt eller forstyrret. Det kan overvejes at inspicere jordprofilen under pladen for inhomogeniteter. Hvis der anvendes en mosgummiskive, skal overfladen under selve pladen afrettes omhyggeligt med retskede. Hvis der anvendes en stiv plade, skal fuld kontakt til jorden sikres ved, at der udlægges et tyndt lag (ca. 10 mm) af tørt finkornet sand, der omhyggeligt afrettes med retskede. Alternativt kan fuldstændig kontakt sikres ved, at pladen støbes fast langs hele undersiden med gips eller rapidcement.

Forsøget omfatter en primær belastning til et givet kontaktryk. Derefter udføres en række aflastnings- og genbelastningssløjfer, der afsluttes med en fuldstændig aflastning. Alle belastninger og aflastninger udføres normalt i flere trin, og lastændringen påføres enten momentant eller med jævn hastighed over en given periode, hvorefter det nye lasttrin fastholdes et stykke tid for at lade jorden konsolidere. Lasten og den lodrette flytning af pladen registreres i alle lasttrin.

Proceduren beskrives ved angivelse af følgende:

- lastens størrelse i alle lasttrin
- lastændringens varighed
- lasttrinets varighed.

Lastens størrelse angives både som kraften på pladen og som kontaktryk (kraften divideret med pladens areal).

Tabel 1 viser en oversigt over de forskellige typer pladebelastningsforsøg, der omtales i det følgende. Beregningerne af resultaterne gennemgås generelt i afsnit 5. Specielle beregningsprocedurer, der knytter sig til de enkelte typer, omtales imidlertid i tilknytning til forsøgene i dette afsnit.

Tabel 1: Oversigt over pladebelastningsforsøg

Betegnelse	Plade type	Pladediameter	Kraftmåler	Flytningsmåler	Procedure
Vejteknisk pladeforsøg I (DGF procedure 1)	Stiv eller fleksibel	ø300 - ø750 mm	Manometer eller krafttransducer	Måleur eller flytningstransducer	Beskrevet i afsnit 3.2
Vejteknisk pladeforsøg II (DGF procedure 2)	Stiv eller fleksibel	ø300 - ø762 mm	Manometer eller krafttransducer	Måleur eller flytningstransducer	Beskrevet i afsnit 3.3
Geoteknisk pladeforsøg (DGF procedure 3)	Stiv	ø100 - ø1000 mm	Krafttransducer	Flytningstransducer	Beskrevet i afsnit 3.4
Specielle pladebelastningsforsøg (DGF procedure 4)	-	-	-	-	Beskrevet i afsnit 3.5

3.2 Forsøgsprocedure for vejteknisk pladebelastningsforsøg I

Denne forsøgsprocedure tager udgangspunkt i "Vejledning i udførelse af statiske pladebelastnings-målinger, Statens Vejlaboratorium", januar 1971.

Tabel 2: Retningslinier for pladestørrelse og kontaktryk. DGF Procedure 1

Underlag	Pladediameter (mm)	Tilstræbt reversibel flytning (mm)	Forventet last	
			Kontaktryk (kN/m ²)	Kraft på plade (kN)
Vejoverflade m.m.	300	0,5 - 1	~ 600	~ 40
Bærelag af grus og bundsikringsgrus	450		~ 150	~ 25
Råjord og fyld af råjord	600		~ 100	~ 30
Slap råjord	750		~ 50	~ 20

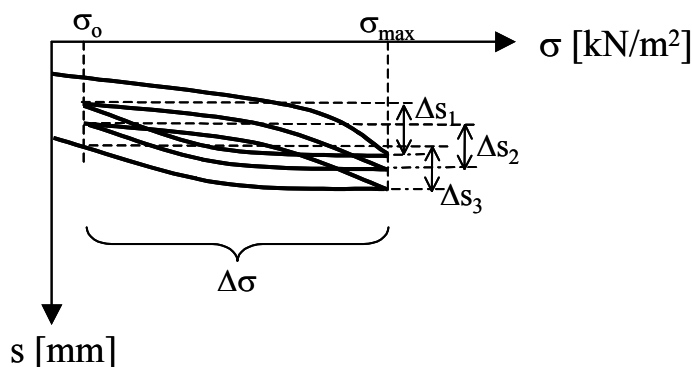


Fig. 2. DGF Procedure 1

Pladestørrelser og kontaktryk skal vælges således, at der opnås en såkaldt reversibel nedsynkning (Δs på figur 2) på 0,5 – 1 mm. Den reversible nedsynkning er defineret som forskellen mellem flytning ved den maksimale belastning og flytningen efter den følgende aflastning.

Erfaringsmæssigt kan der for forskellige aflejringer benyttes pladestørrelser og forventede kontaktryk som angivet i tabel 2.

Ved forsøget belastes og aflastes efter nedenstående retningslinier, jf. figur 2:

1. Nulpunkt for flytninger registreres for den ubelastede plade.
2. Der belastes op til det ønskede kontaktryk (σ_{\max}) og belastningen holdes konstant i 1 minut. Derefter registreres flytning og belastning.
3. Der aflastes til σ_0 . Flytning og belastning registreres efter 1 minut.

Punkterne 2 og 3 udføres tre gange, hvorefter forsøget er afsluttet. Under forsøgets 1. trin kontrolleres, at den reversible nedsynkning (Δs_1) ikke overstiger 1 mm. Sker dette, afbrydes forsøget.

Efter forsøget udregnes middeltallet ($\Delta s = (\Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3) : 3$) af de tre målte reversible nedsynkninger. Afviger de enkelte målte reversible nedsynkninger mere end 5% fra Δs , må forsøget kasseres.

3.3 Forsøgsprocedure for vejteknisk pladebelastningsforsøg II

Denne forsøgsprocedure tager udgangspunkt i ”Plattendruckversuch, DIN 18134”, 2001.

Tabel 3: Retningslinier for pladestørrelse og kontaktryk. DGF Procedure 2.

Underlag	Pladediameter (mm)	Maksimal flytning (mm)	Maksimal belastning (kN/m ²)	Forventet E-værdi (MN/m ²)
Overside af grusbærelag, faste glaciale aflejringer	300	5	500	>30
Bundsikringslag, glaciale afl.	450	-	-	15-30
Fyld af råjord, slap råjord.	600	7	250	3-30
Fyld af råjord, meget slap råjord.	762	13	200	1-5

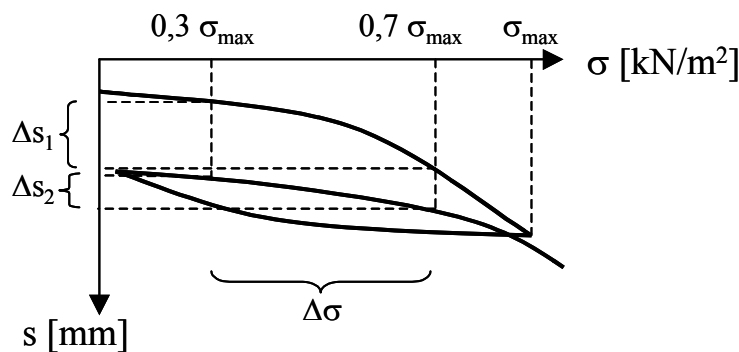


Fig. 3. DGF Procedure 2

Pladestørrelser og kontaktryk skal vælges således, at der ved en pladediameter på 300 mm enten opnås en flytning under pladen på 5 mm, eller at maksimalbelastningen på 500 kN/m² er nået. Ved en pladediameter på 600 mm andrager de tilsvarende grænseværdier 7 mm eller 250 kN/m². Ved en pladediameter på 762 mm er grænseværdierne 13 mm eller 200 kN/m², jf. tabel 3.

Forsøget kan afbrydes ved mindre flytning hhv. belastninger, hvis underlaget, der undersøges, har ringe kornfasthed (fx letklinker), eller hvis belastningsforøgelsen varsler et snarligt brud (for stor flytning).

Den maksimale belastning tilvejebringes ved mindst 6 belastningstrin med lige store belastningsintervaller. Aflastning foretages i tre trin svarende til 50%, 25% og 0% af maksimalbelastningen.

Be- eller aflastning til nye trin skal være afsluttet inden for 1 minut. Under de enkelte belastningstrin skal belastningen holdes konstant, og flytningen aflæses. Ved belastning aflæses flytningen efter 2 minutter. Ved aflastning aflæses efter 1 minut. Herefter genbelastes op til næstsidste belastningstrin efter ovennævnte belastningsprocedure. Forsøget afsluttes med en fuldstændig aflastning.

Elasticitetsmodulet og komprimeringsgraden bestemmes, jf. figur 3:

- fra første belastningsgren E_{v1} ud fra $\Delta\sigma$ og Δs_1
- fra anden belastningsgren elasticitetsmodulet E_{v2} ud fra $\Delta\sigma$ og Δs_2
- E_{v1} og E_{v2} ud fra flytningerne ved 30 % og 70 % af maksimalbelastningen (σ_{max})
- forholdet E_{v2}/E_{v1} som et mål for komprimeringsgraden i materialet.

E_{v1} og E_{v2} kan alternativt bestemmes ved at tilnærme belastningsgrenene til et 2. grads polynomium, der defineres ved mindste kvadraters metode til forsøgsresultaterne. Resultatet er imidlertid helt sammenligneligt med den ovenfor beskrevne enklere metode.

3.4 Forsøgsprocedure for geotekniske pladebelastningsforsøg

Geotekniske pladebelastningsforsøg udføres for at bestemme et aktuelt jordlags styrke- eller deformationsegenskaber.

Forsøget udføres oftest i forbindelse med bestemmelse af deformationsegenskaberne. Det er her ofte ønskeligt, at kontaktrykket under pladen ved forsøget svarer til kontaktrykket i jorden forårsaget af den færdige konstruktion. Der vælges en pladestørrelse, der i princippet er relevant i relation til den færdige konstruktion. Imidlertid sætter det modhold, der rent praktisk

kan mobiliseres, en begrænsning på pladestørrelsen. Der anvendes ofte en plade med en diameter på 400 mm.

I sjældnere tilfælde anvendes et pladebelastningsforsøg til bestemmelse af styrkeegenskaberne. Det skal i så fald sikres, at brudtilstanden kan opnås med det modhold, der er til rådighed.

Styrkeparametrene beregnes med bæreevneformlen, hvor q -ledet omfattende trykket af jorden i niveau med pladens underside medtages (da pladen i brudsituationen er trykket ned i den afrettede overflade). Et eventuelt kapillarvandtryk skal ligeledes indregnes i q -ledet, og vandspejlets position og jordens kapillaritet indgår i beregningen og skal derfor bestemmes.

Geotekniske pladebelastningsforsøg udføres med stive plader. Der indlægges som regel en række aflastnings-, genbelastningssløjfer for at bestemme de elastiske egenskaber ved genbelastning.

Af hensyn til nøjagtigheden skal belastningen registreres med en elektrisk krafttransducer placeret direkte på pladen.

Forsøgsresultaterne præsenteres som en fuld arbejdskurve, hvorfor belastning og flytning skal registreres under hele forsøget. Det er således hensigtsmæssigt, at forsøget monitoreres med elektrisk datalogging.

Det skal i forbindelse med et geoteknik pladebelastningsforsøg overvejes, om forsøget skal udføres som et drænet eller et udrænet forsøg. Drænede forsøg på vandmættet ler er meget tidskrævende og hermed kostbare at udføre, idet forsøgstider på op til flere uger kan forekomme. Hvis et forsøg udføres som et udrænet forsøg, indlægges ofte en pause ved en specifik belastning for at vurdere de tidsmæssige effekter (dræning og krybning).

3.5 Forsøgsprocedure for specielle pladebelastningsforsøg

Forsøgsprocedurerne for specielle belastningsforsøg skal fastlægges specifikt og detaljeret i relation til den aktuelle anvendelse. Der foreskrives ikke nogen generel DGF-procedure for disse forsøg.

Specielle pladebelastningsforsøg kan fx omfatte forsøg udført på store insitu støbte armerede betonplader. Som modhold anvendes ofte lodrette jordankre. Forankringszonen bør da være dybere end svarende til 2 pladediametre under pladens underside. Forsøgene kan udføres efter samme principper som forsøget i afsnit 3.4. Det skal kontrolleres, at målebroyen er fikseret under forsøget ved indmåling af broen ved nivellementer flere gange under forsøget (uden og med belastning på pladen).

Forsøgsopstillingen suppleres ofte med nedborede sætningsmålere og poretryksmålere. Jorden i forsøgsfeltet bør beskrives ved geotekniske boringer, eventuelt suppleret med referenceforsøg som fx pressiometerforsøg. Forsøgshastigheden bør overvejes nøje, idet bl.a. drænforholdene kan have stor betydning for resultaterne. Rapporten bør give et detaljeret indtryk af forsøgsopstillingen, kalibrering af transducere, forsøgenes udførelse og resultater.

4. JOURNAL

Alle relevante data for det enkelte forsøg skal rapporteres i en markjournal. Foruden sædvanlig identifikation (dato, lokalitet, måletekniker etc.) skal journalen som minimum indeholde:

- angivelse af forsøgstype
- afretningskoten i forsøgspunktet
- jordart, hvorpå forsøget er udført
- en skitse med indmåling af forsøgsområdet, evt. suppleret med foto
- angivelse af anvendt materiel, herunder pladens diameter og anvendt måleudstyr

(donkrafte, måleur/transducer)

- måleresultater (selv ved elektrisk registrering noteres hovedresultaterne fra forsøget)
- eventuelle bemærkninger om forhold, der kan have indflydelse på resultaterne.

Resultaterne fra belastningsforsøget præsenteres som regel i form af en arbejdskurve, der viser sammenhængen mellem belastning og flytning. Ofte foretages en digital opsamling af data i marken, der vil indeholde flere af ovennævnte punkter.

5. BEREGNING

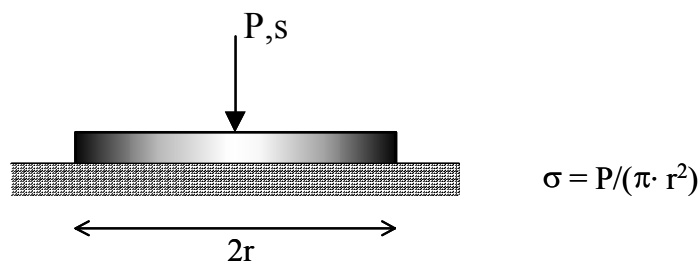


Fig. 4. Beregning af σ

Elasticitetsmodulet (Young's modul – E) findes af belastningen (σ), pladens radius (r) og den målte flytning (s) af:

$$E = c \sigma r / s \quad (1)$$

Konstanten c, der afhænger af Poisson's forhold (μ) for jorden, og om der anvendes en stiv plade, eller en fleksibel plade med konstant kontakttryk og om flytningen måles centralt på jordoverfladen. De teoretiske værdier af c for homogen jord er angivet i tabel 4.

Tabel 4: Værdier af c

μ	Stiv plade	Fleksibel plade*	Anbefalet værdi
0,25	1,47	1,88	1,5
0,50	1,18	1,50	

*/ Flytning bestemmes som sætning af pladens centrum

Da Poissons forhold som regel ikke kendes, anvendes generelt værdien $c = 1,5$. Denne værdi er den anbefalede værdi i dette referenceblad. Elasticitetsmodulet beregnes ofte ved belastningstilvæksten ($\Delta\sigma$) og den tilsvarende målte flytning (Δs).

Ligning (1) omskrives således til

$$E = 1,5 \Delta\sigma r / \Delta s \quad (2)$$

Det fremgår af anvendelsen eller procedureforskrifterne, hvorvidt E skal beregnes af primær-grenen eller af aflastnings- eller genbelastningsgrenen på arbejdskurven.

6. KVALITETSSIKRING

6.1 Udstyret

Forud for det enkelte pladebelastningsforsøg kontrolleres:

- pladediameter
- afstanden mellem pladens center og modholdsarrangementets understøtningspunkter
- kalibrering af donkraften og kraftmålearrangementet til den forventede maksimale forsøgslast og med en nøjagtighed på 5%. Kalibrering af måleure og elektriske flytningsmålere med en nøjagtighed bedre end 0,01 mm. Benyttes computerstyret datalogger med elektriske kraft- og flytningsmålere skal disse have været benyttet ved kalibreringen
- at måleure og flytningsmålere har korrekt visning af flytning i forsøgsopstillingen (kontrolleres ved indsætning af et målemne med kendt størrelse)
- kalibreringscertifikaterne ikke er ældre end 12 måneder.

6.2 Udførelsen

Under udførelsen kontrolleres:

- at målebreen for flytningsmålere er afskærmet mod vind og sol
- at journalen er korrekt udfyldt.