



Måling af overflademodul med minifaldlod

prVI 90-4:2007

Vejteknisk Institut
Provisorisk prøvningsmetode 90-4
Januar 2007



Vejdirektoratet

Måling af overflademodul med minifaldlod

prVI 90-4:2007

Udgivet: Januar 2007

Revideret:

Revideret:

Vejdirektoratet

Vejteknisk Institut

Guldalderen 12

2640 Hedehusene

Telefon 72 44 70 00

Telefax 72 44 71 05

Forord

Denne prøvningsmetode er udarbejdet af Vejteknisk Institut i serien „Provisoriske prøvningsmetoder“. Provisoriske prøvningsmetoder beskriver forsøg, som Vejteknisk Institut anvender til vurdering af egenskaber af et materiale eller eventuelt en kombination af materialer. Provisoriske prøvningsmetoder kan også være relevante i forbindelse med vurdering af kvaliteten af arbejde udført in situ.

Prøvningsmetoden for minifaldlod er udarbejdet af en arbejdsgruppe bestående af repræsentanter for leverandører/fabrikanter samt brugere af udstyret. Arbejdsgruppen har ved udarbejdelsen af prøvningsmetoden taget udgangspunkt i det udstyr, som på afrapporteringstidspunktet var tilgængeligt i Danmark.

Arbejdsgruppen har været ledet af Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut. I januar 2006 havde arbejdsgruppen følgende medlemmer:

Gregers Hildebrand, Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut
Brian Henriksen, Dynatest
Finn Iversen, Carl Bro Pavement Consultants
Troels Kragh, Carl Bro Pavement Consultants
Jens Preben Pedersen, Carl Bro Pavement Consultants
Konstantin Pedersen, Gravquick
Morten Vanggaard, Skude & Jacobsen A/S (tidligere GEO)

Formål

Formålet med metoden er at bestemme overflade E-modulet, også kaldet overflademodulet, af ubundne vejmaterialer in situ. Prøvningsmetoden kan anvendes ved undersøgelser til vurdering af de fleste ubundne materialetyper, der benyttes til anlægsarbejder i Danmark. Metoden kan også bruges til prøvning på stabiliserede materialer.

Anlæg af veje kræver blandt meget andet information om vejmaterialerne før, under og efter arbejdets udførelse. Grundig viden om vejmaterialerne i projekteringsfasen er en forudsætning for at planlægge et godt projekt, mens materialedata under selve byggeriet af vejen er afgørende for at behandle materialerne korrekt og dermed opnå den optimale kvalitet af byggeriet. Efter vejens åbning er information om vejmaterialernes tilstand vigtig for at kunne overvåge vejens nedbrydning og dermed planlægge vedligeholdelsesindsatsen.

Et nøjagtigt kendskab til bæreevnen af de ubundne befæstelseslag under vejens anlæg giver mulighed for optimering af vejens dimensionering. Desuden vil man med målinger under byggeriet af vejen kunne reducere omfanget af områder med bæreevneforhold, som afviger væsentligt fra den gennemsnitlige værdi, hvilket forventes at forøge vejens samlede levetid.

Forhold til andet måleudstyr

Minifaldlodsmålinger kan med fordel bruges til at bestemme E-værdien af råjord. De traditionelle CBR- og Standard Proctor forsøg vil typisk også være nødvendige for at bestemme jordens følsomhed overfor vandindhold.

Når indbygningen af ubundne lag kontrolleres, kan minifaldlodsmålinger ikke erstatte komprimeringskontrol med isotopsonde. Komprimeringskontrollen skal sikre, at materialet er indbygget med optimal tæthed, så man undgår efterfølgende sætninger. Først når indbygningen er afsluttet, er det relevant at måle E-værdier. Derfor bør isotopsonde og minifaldlod anvendes i kombination, idet man herved bør kunne opnå sikkerhed for optimalt håndværk og et godt billede af materialets egenskaber.

Det store faldlod måler efter samme princip og giver tilnærmelsesvis samme resultater som minifaldlod, ved samme pladetryk. Måling med det ene eller det andet faldlod afhænger af det udstyr man har, samt om underlaget er kørestabilt. Til undersøgelse af veje med slid- eller bærelag af asfalt og beton bør man anvende det store faldlod, da der kræves et relativt stort pladetryk. Ved minifaldlodsforsøget bestemmes typisk overflademodulet, E_0 . Overflademodulet udtrykker en gennemsnitlig E-værdi for det jordvolumen der ligger under målepunktet. I modsætning hertil kan man med det store faldlod bestemme E-værdier for de enkelte lag i opbygningen.

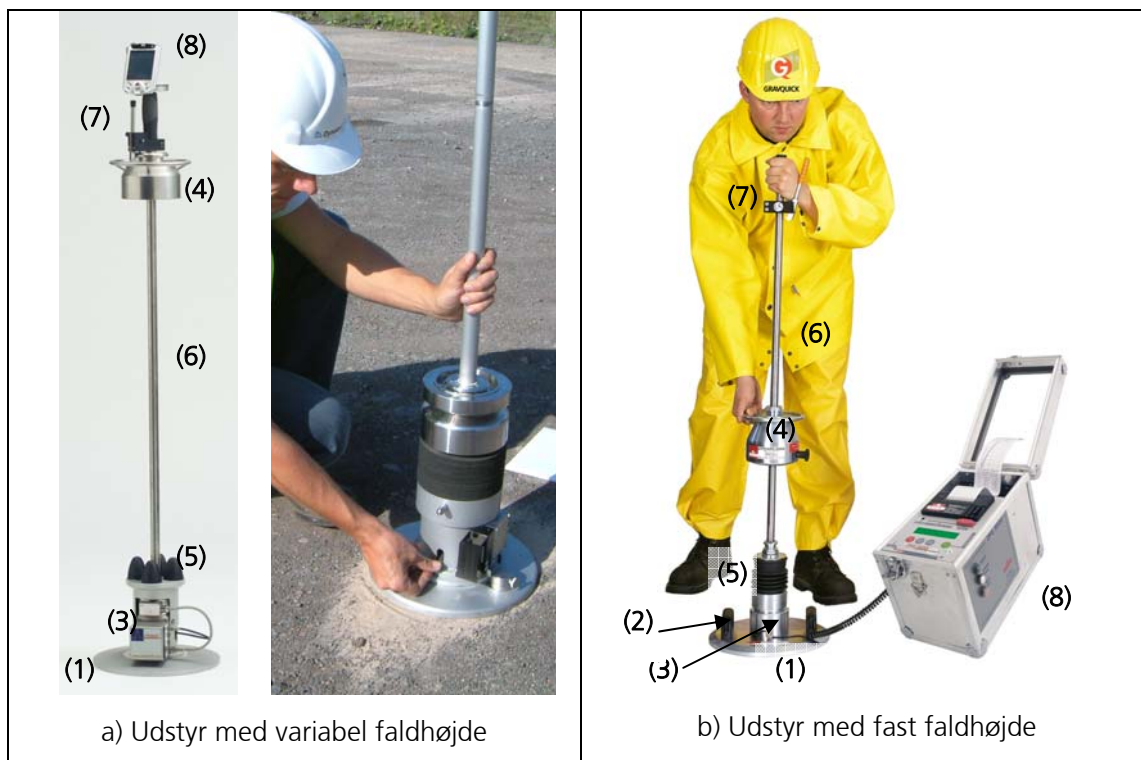
Sammenhængen mellem målinger med minifaldlod og statisk pladebelastning undersøges p.t.

Princip

Minifaldlod betegner let, bærbart udstyr, som på baggrund af en kendt lastpåvirkning fra en vægt droppet fra en givet højde på en stiv, cirkulær plade giver et udtryk for underlagets bæreevne. Udstyrstypen har potentiale til at give simple målinger af bæreevnen af råjord og komprimerede sand- og grusmaterialer. Alternative og mere ukonventionelle ubundne materialer kan ligeledes testes med minifaldlod.

Apparatur

Minifaldlod fås i forskellige fabrikater med lidt forskelligt udseende og muligheder, men grundprincipperne i målingerne er de samme. Figur 1 viser principielle udgaver af to typer minifaldlod: Udstyr med fast henholdsvis variabel faldhøjde. Et udstyr med variabel faldhøjde anbefales, da det giver mulighed for at bestemme det målte materiales spændingsafhængighed.



Figur 1. Fotografier af de to typer minifaldlod. Numrene forklares i teksten herunder.

Udstyret består af følgende komponenter (numre henviser til Figur 1):

1. Lastplade, typisk $r = 150$ mm
2. Bærehåndtag
3. Måleenhed til registrering af nedsynkningen og belastningen
4. Lod, typisk 10 kg
5. Fjederelement
6. Styrestang for lod
7. Udløsermekanisme
8. Dataopsamlingsenhed

1 – Lastplade

Standardopsætningen omfatter en plade med en diameter på 300 mm. Typisk kan andre plade størrelser monteres på udstyrene. Mindre plader giver – for samme faldhøjde – en større spænding under pladen og kan derfor med fordel bruges på stivere materialer.

2 – Bærehåndtag

Til håndtering og placering af lastpladen.

3 – Måleenhed

Måleenheden indeholder det måleudstyr der registrerer jordoverfladens nedsynkning under belastningen. Nedsynkningen kan registreres med geofon eller accelerometer.

Udstyr med variabel faldhøjde har en vejecelle i måleenheden, der måler den kraft der bliver overført til bundpladen. Udstyr med fast faldhøjde er kalibreret til altid at levere samme kraft og pulstid, henholdsvis 7,07 kN og 18 ms, så disse måles ikke.

4 – Lod

Til standardopstillingen benyttes et 10 kg lod. Loddet er udformet så det kan fastholdes af udløsermekanismen på faldstangen. Nogle udstyr kan påmonteres ekstra lodder, der kan være nødvendige ved måling på stivere materialer. Øges loddets vægt, skal der tilsvarende monteres ekstra buffere (fjederelementet), som skal monteres symmetrisk.

5 – Fjederelement

Fjederelementet overfører den dynamiske energi fra det faldende lod til lastpladen, og gør det muligt at justere pulstiden i forhold til lodvægten.

Udstyrene i Figur 1 benytter tre forskellige varianter af fjederelementer. På udstyret i Figur 1b) består fjederelementet af en tallerkenfjeder i stål, mens udstyrene i Figur 1a) har henholdsvis 2-5 gummibuffere eller udskiftelige cylinderformede mosgummielementer.

6 – Styrestang

En cirka 1 m lang stang, der styrer loddets fald ned på fjederelementet.

7 – Udløsermekanisme

Udløsermekanismen sidder på styrestangen. Når den udløses startes loddets fald ned mod fjederelementet.

På udstyret i Figur 1b) er mekanismen placeret i en nøje fastlagt højde over lastpladen, således at den dynamiske energi der frigøres ved en udløsning af faldloddet får en fast defineret størrelse når det rammer lastpladen. Udstyrene i Figur 1a) har udløsermekanismer der kan placeres i variabel højde over fjederelementet, så den overførte kraft og dermed påførte spænding kan varieres.

8 – Dataopsamlingsenhed

Dataopsamlingsenheden kan være en produktspecifik skriver, bærbar computer eller en håndholdt PDA. Enheden indsamler og viser oplysninger om nedsynkninger, evt. kraft og pulstid, samt beregnet overflademodul.

Hjælpemidler:

Udover det ovennævnte apparatur bør følgende hjælpemidler anvendes:

Normalsand (til evt. afretning af overfladen)
Stållineal (til afretning af overflade)
Børste
Blød klud

Kalibrering

For at sikre brugbare og pålidelige målinger med minifaldloddet, bør udstyrets accelerometer/geofon og vejecelle kalibreres mindst 1 gang om året. Kalibreringsperioden forudsætter, at apparatet er behandlet og anvendt i henhold til medfølgende brugervejledning.

En regulær certificeret kalibrering kan kun udføres af dertil autoriserede institutioner eller producenter. Kalibreringen skal udføres med sporbart måleudstyr. Kalibreringen skal kunne verificeres og dokumenteres.

Minifaldlod med fast faldhøjde kan kalibreres i henhold til den tyske standard TPF – StB Teil B8,3-7.

Fremgangsmåde

I en standardopstilling anvendes en pladestørrelse på Ø 300 mm og et 10 kg lod. Afhængigt af materialetypen der måles på, kan det være nødvendigt at anvende ekstraudstyr som ekstra lod eller andre pladestørrelser.

I nedenstående oversigt er angivet hvilke pladetryk (spænding) der bør opnås på forskellige materialer for at få pålidelige målinger. De anbefalede pladetryk er ligeledes et billede af den typiske belastning de enkelte lag udsættes for i den færdige konstruktion.

Grus bærelag	200 – 300 kPa	(ved brug af 20 kg lod eller 200 mm plade)
Bundsikringslag	100 – 200 kPa	
Fast underbund	50 – 100 kPa	
Blød underbund	10 – 60 kPa	(lavere faldhøjde)

Ved målinger på friktionsmaterialer anvendes pladetryk svarende til bære- eller bundsikringslag. Ved målinger på kohæsionsmaterialer anvendes pladetryk svarende til underbund.

Ud over dette pladetryk bør den målte reversible nedsynkning være på mellem 500 og 1500 µm, svarende til 0,5 til 1,5 mm, dog maksimalt 2200 µm og minimum 300 µm.

På udstyr hvor kraften kan varieres skal det ydermere sikres at pulstiden er som ønsket. I standardopstillingen skal anvendes en pulstid på 15-25 ms. Hvis der laves målinger ved forskellig faldhøjde vil pulstiden ændres. Ved standardmålinger accepteres disse ændringer i pulstid når faldhøjden øges, også selvom de går udover de 15-25 ms.

Ønsker man at lave målinger der kan sammenlignes med målinger fra et andet udstyr, bør pulstiden svare til dette. Eksempelvis er pulstiden på store faldlod typisk 25-30 ms. Pulstiden ændres ved at ændre antallet eller typen af fjederelementer.

Målinger på råjord samt ubundne materialer

Målinger på råjordsmaterialer, såvel intakt som indbygget, skal så vidt muligt foretages i frostfri tilstand, ved materialets naturlige vandindhold og over vandspejl, og således at der hverken forekommer skorper eller fritliggende vand. Det bedste resultat opnås på netop frilagt område, men alternativt kan skorpen eller det fritliggende vand fjernes umiddelbart før målingen.

Opstilling og udførelse

For at få en korrekt og brugbar måling med minifaldlod er det især vigtigt, at sikre at bundpladen har god kontakt med underlaget, således at kontaktrykket fordeles jævnt under slagene. Den bedste måde at sikre sig dette på er ved at skrabe en plan overflade med linealen, fjerne større synlige sten og ved at benytte et tyndt lag normalsand mellem lastplade og underlag, som jævnes ud og planes, så pladen ligger vandret. Det skal ligeledes sikres, at geofonens/accelerometerets trykfod kan bevæge sig frit.

Inden der foretages en måling, skal det sikres at dataopsamlingsprogrammet (computer eller PDA) er indstillet korrekt. Det sikres eksempelvis, at pladeradius svarer til det anvendte (normalt 150 mm), samt at Possions forhold er angivet som ønsket (normalt 0,5), og at spændingsfordelingsfaktoren er angivet korrekt (oftest 2). Desuden er en entydig beskrivelse af målepunktet nødvendig.

E-modulet af ubundne materialer er afhængig af den spænding der påføres under målingen. På lerjord falder E-modulet typisk med stigende belastning, hvilket også betegnes som negativ non-lineær sammenhæng, hvorimod det omvendte normalt gør sig gældende på friktionsjord, dog i mindre omfang. Derfor opnås den bedste vurdering af et materiales bæreevne ved at der foretages målinger ved forskellige pladetryk (typisk ved at variere faldhøjden). Afhængigt af materialet der måles på, anbefales 2-4 forskellige pladetryk i hvert målepunkt, altid startende med laveste tryk. Materialets non-linearitet kan beskrives ved hjælp af formlen i Annex A.

Når udstyret er korrekt opstillet, udføres gentagne målinger med samme faldhøjde, indtil der opnås tre slag, der viser nedsynkninger med en indbyrdes spredning på mindre end 5 %. Resultatet af målingen er middelværdien af overflademodulet fra disse tre slag. Herefter kan pladetrykket ændres (f.eks. ved at øge faldhøjden), og proceduren gentages.

Udstyret bør efter endt brug rengøres ved at tørre eller børste skidt og jord af lastpladen og omkring geofonens/accelerometerets fod.

Beregninger

Det primære resultat fra minifaldlodsmålingen er overflade E-modulet, E_0 , som beregnes efter følgende formel:

$$E_0 = \frac{f \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_0} \quad (1)$$

hvor:

E_0	=	overflademodul (MPa)
f	=	spændingsfordelingsfaktor, normalt 2
ν	=	Poissons forhold, normalt 0,5
σ_0	=	pladetryk (MPa eller kN/m ²)
a	=	pladeradius, normalt 0,150 m
d_0	=	nedsynkning (m)

For en ensformigt fordelt belastning på råjord kan f sættes til 2 og Poissons forhold til 0,5. Herved reduceres udtrykket til:

$$E_0 = \frac{1,5 \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_0} \quad (2)$$

Overflademodulet angives ved det tryk (i kPa) det er målt ved, f.eks. $E_{0,100}$ hvis pladetrykket, σ_0 var 100 kPa under målingen.

Ubundne vejmaterialer er kun sjældent perfekt lineært elastiske. Materialets non-linearitet kan beskrives ved hjælp af parametrene C_0 og n i Anneks A.

Rapportering

I forbindelse med minifaldlodsmålinger, er sammenligneligheden vigtig, for netop at kunne sammenligne med tidligere forsøg og erfaringer, og for at kunne foretage brugbare før/efter-målinger. Desuden er det vigtigt for modtageren af målingerne, at kende forudsætningerne for målingerne.

Rapporteringen er derfor en vigtig del af målearbejdet, og derfor bør følgende oplysninger medtages i afrapporteringen:

1. Type af udstyr, inkl. fysisk udstyr, herunder ekstra udstyr og evt. dataopsamlingsprogram.
2. Udførende firma og person.
3. Dato for forsøg.
4. Entydig stedfæstelse af målinger.
5. Signaturer fra udførende og kontrollant.

6. Beskrivelse af underlag hvorpå forsøget er udført, samt relevant information om omgivelserne. Herunder kan det angives, hvornår et materiale blev komprimeret, vejrforhold i forbindelse med komprimeringen og indtil minifaldlodsmålingen
7. Situationsplan med angivelse af målepunkter, evt. med billeder af område og opstilling.
8. Pladestørrelse (diameter).
9. Lufttemperatur ved forsøgets udførelse.
10. Værdier for spændingsfordelingsfaktoren f og Poissons forhold ν , som er anvendt ved de afrapporterede målinger.
11. Resultater, herunder pladetryk, pulstid, nedsynkning og overflade E-modul. Sidstnævnte angives med det pladetryk målingen er udført med, f.eks. $E_{0,100} = 51$ MPa. Det anbefales at målinger på de forskellige vejmaterialer afrapporteres ved standard pladetryk som i tabellen herunder:

Grus bærelag	$E_{0,250}$
Bundsikringslag	$E_{0,150}$
Fast underbund	$E_{0,100}$
Blød underbund	For svagere jordarter, f.eks. lerjord, er det ikke altid muligt at måle ved så højt et pladetryk. Disse jordarter vil ofte have et minimumspunkt (se eksempel i Anneks A). Her afrapporteres minimumspunktet som $E_{0,x, \min}$, hvor x erstattes af pladetrykket ved minimumspunktet, f.eks. 60.

12. Materialets non-linearitet kan rapporteres ved at angive C_0 og n i Anneks A. Hvis andre funktioner bruges til at beskrive non-lineariteten skal dette angives.

Generelt for alle angivelser af tal og værdier, bør det kun angives med et passende antal betydende cifre. F.eks. bør både pladetryk, nedsynkning og E-moduler angives uden decimaler i henholdsvis kPa, μm og MPa.

De ubehandlede forsøgsresultater bør vedlægges rapporten som bilag.

Præcision

Målenøjagtigheden for udstyr der måler med variabel faldhøjde er ± 2 % i måleområdet fra 0 – 2200 μm .

For udstyr med fast faldhøjde er målenøjagtigheden for nedsynkningen indenfor måleområdet 200 μm – 1000 μm bedre end ± 20 μm . I måleområdet 1000 μm – 2000 μm vil målenøjagtigheden være bedre end ± 2 % af måleresultatet.

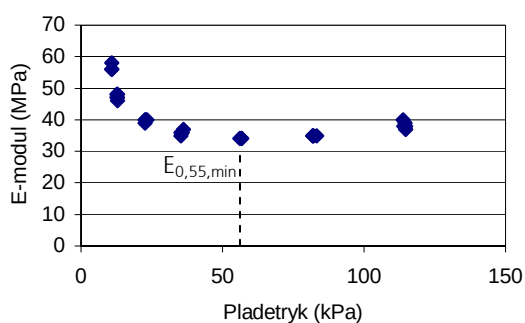
Vurdering af repeterbarhed og reproducerbarhed på overflademodulmålingen vil blive beskrevet når der er opnået flere erfaringer.

Anneks A (informativt)

Ubundne materials spændingsafhængighed

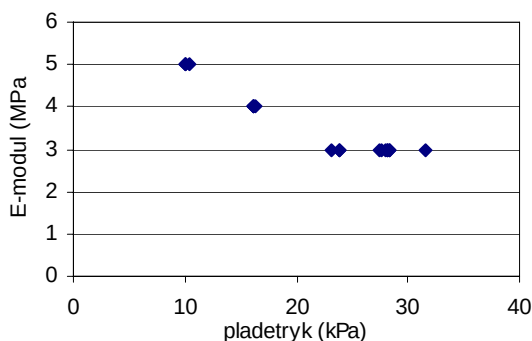
- Et studie af minifaldlodsmålinger på motorvejsprojektet Ris-Ølholm

Jordarter kan kun tilnærmelsesvis betragtes som lineært elastiske, hvilket betyder at E-modulet varierer i forhold til det tryk jordarten bliver udsat for. Det er derfor vigtigt at variere det pladetryk man benytter under målingerne alt afhængig af det materiale der måles på og den fremtidige belastning det bliver udsat for. En typisk sammenhæng mellem pladetryk og E-modul for lerjorde ses i Figur A.1, hvor E-modulet er højt ved lave pladetryk, men faldende indtil minimumspunktet for herefter at have en konstant værdi eller svag stigning indtil brudpunktet.



Figur A.1. Intakt råjords afhængighed af det påførte pladetryk.

En typisk kurve for indbygget råjords afhængighed af det påførte pladetryk fremgår af Figur A.2.



Figur A.2. Typisk afhængighed af det påførte pladetryk for indbygget råjord.

For stabilt grus sker der en forøgelse af E-modulet ved øget påført pladetryk.

Ved hjælp af en simpel regressionsanalyse kan overflademodulen beskrives som en potensfunktion af overfladespændingen. Denne beskrivelse gør det muligt i senere analyser (tilnærmelse) at beregne, hvad overflademodulen vil være, når der er udlagt andre lag oven på den ak-

tuelle skilleflade. Regressionsanalysen kan karakteriseres som "god" eller "tvivlsom" ud fra en vurdering af korrelationskoefficienten. Grænseværdien for korrelationskoefficienten er i, dette studie, arbitrært fastlagt til $R^2 = 0,7$.

Funktionen har formen:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{\sigma_o}{100 \text{ kPa}} \right)^n$$

hvor C_0 angiver overflademodulen ved et kontakttryk på 100 kPa, og eksponenten n giver en indikativ information om underlagets overordnede beskaffenhed. Hvis $n > 0$ opfører underlaget sig som et friktionsmateriale, hvor stivheden øges ved stigende dynamisk kontakttryk, hvis $n < 0$ er reaktionen som for kohæsive materialer, hvor stivheden aftager ved stigende dynamisk kontakttryk.

Referencer

COWI A/S (juni 2005): Minifaldlodsmålinger på motortrafikvejsprojektet Ris-Ølholm - Datareduktion og analyse af målinger, Rapport til Vejdirektoratet.