

Brugen af **let faldlod**

Denne artikel handler om den danske udgave af det lette faldlod, og målet er gennem eksempler på anvendelsen at give et billede af, at det ingeniørmæssigt såvel som økonomisk kan betale sig at have styr på bæreevnen på bogstaveligt talt alle niveauer i et projekt. Udover det tekniske og økonomiske aspekt, så giver det også ro i sjælen. Det er meget mere behageligt end is i maven og nervøs venten på, at noget går galt.



Af Cand. Scient. Poul-Erik Jakobsen,
Grøntmij I Carl Bro A/S
pja@gmcb.dk

Det lette faldlod bruges til at udføre målinger af bæreevnen på ubundne materialer. Det vil sige på sand, grus, ler, betonknus o. lign. Bæreevnen måles i enheden MPa. På ubundne materialer og på opbygninger med ubundne materialer måles typisk størrelser fra 0-200 MPa. Bæreevnen betegnes med E , heraf også betegnelsen E -moduler. E_m for materialekarakteristisk E -modul og E_0 for overflade E -modul.

Faldloddet fungerer kort beskrevet ved, at et lod falder ned på en bundplade, der står plant på overfladen, se figur 1.

Standarder

Den danske løsning adskiller sig fra de øvrige på markedet ved anvendelsen af en vejecelle (kraftmåler) på samme måde som på de store traditionelle faldlod.

Anerkendelsen af dette som den rigtige løsning må være, at ASTM har udarbejdet en standard for brugen af det danske lette faldlod "ASTM E2583-07 Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer". Highway Agencies, Storbritannien har skrevet den ind i deres IAN 73/06. Endelig har Vejdirektoratet i Danmark udarbejdet "Måling af overflademodul med minifaldlod" – prVI 90-4:2007.

ASTM-standardens bruger betegnelsen Light Weight Deflectometer – forkortet til LWD. Det er den betegnelse vi vil anvende for det lette faldlod for at vise familieforholdet til de traditionelle faldlod (Falling Weight Deflectometer - FWD) og samtidig

viser, at det ikke er en FWD, vi taler om her, men en LWD.

Et kort tilbageblik

PRIMA100 LWD er bygget på grundlag af den samme højtudviklede teknologi, som anvendes til de store FWDere, der har været under kontinuerlig udvikling, siden de første blev bygget i 1968.

De allerførste store faldlod kunne alene måle deflektion (nedbøjning) i centrum. Senere kom teknikken til at måle nedbøjninger i flere afstande ud fra centrum og til at indbygge kraftmålere (vejecelle). Dette gav muligheden for en eksakt måling.

Vejecellen er vigtig

Altså er PRIMA100 LWD udstyret med både vejecelle og geofon (deflektionssensor). Og netop ønsket om at gøre dette, var en af drivkræfterne bag udviklingen af LWDen. Da udviklingen startede op i 1997, var lette faldlod tilgængelige, men uden indbygget vejecelle.

Anvendelsen af vejecellen er forudsætningen for korrekt måling af E -moduler. Vi må kort vende os mod formelen for beregning af overflade E -moduler.

$$E_0 = f \times (1 - \nu^2) \times \sigma \times a / d_0$$

f er spændingsfordelingsfaktoren, ν er Poissons ratio, a er radius på bundplade. Disse størrelser er kendte. σ (spænding) og d_0 (centerdeflektionen) er de eneste ukendte størrelser, og derfor er det netop dem, vi måler med PRIMA100 LWD.

På udstyr, der ikke anvender en vejecelle, forudsætter man, at en given faldhøjde medfører en given kraft. Det er for så vidt også helt korrekt.



Figur 1.
PRIMA100 let faldlod.
Lod og bundplade ses tydeligt.
Operatøren opsamlers data
på lommecomputer – PDA



PRI2100 FWD i den 'voldsomme' udgave, der anvendes i lufthavne, hvor Airbus380 skal lande.

Grunden til, at det går galt med disse udstyr er, at størrelsen af den spænding, der overføres til underlaget, er afhængig af underlaget. En given faldhøjde giver ikke samme spænding på sand, grus, ler, blød ler, gytje.

En af vores danske entreprenørkunder gav for nogen tid siden en rigtig god analogi til at forstå fænomenet:

Du slår (uheldigvis) dig selv over fingrene med en hammer. Vil du helst have en hård bordplade eller en blød madras under fingrene, når du rammer? Den spænding, der overføres til det bløde underlag (typisk visse lerholdige lag), er væsentligt mindre end det, der overføres til det faste underlag (typisk sand/grus lag).

Denne spænding ses at gå direkte ind i formlen. Det betyder, at når størrelsen af spændingen varierer med 20-30%, er det meget væsentligt, at der anvendes vejecelle for at sikre korrekte målinger og efterfølgende vurderinger og beregninger.

Konsekvenser

Tænker man på konsekvenserne i fx vejbygning, vil en overvurdering af den overførte spænding give en overvurdering af bæreevnen på planum. Konsekvensen er en vejopbygning, der ikke lever op til forudsætningerne og derfor en vej, der på kort eller mellemlang sigt oplagt får uventede og uforståelige skader.

Anvendelser

Det fører os behændigt videre til, hvor PRIMA100 kan anvendes. De typiske områder er kontrol af planum, kontrol af vej- og pladsopbygninger og underlag for fx industrigulve. Eller den kan bruges til bl.a. fastlæggelse og kontrol af råstofkvalitet, do-

kumentation i forbindelse med kalkstabilisering med mere.

Kontrol af planum

Ved design og opbygning af en vej, et industrigulv eller en plads forudsættes en bæreevne for planum – en E_0 værdi. Hvis denne værdi ikke er til stede ude i virkeligheden, vil det færdige anlæg enten være overdimensioneret eller underdimensioneret.

En overdimensionering holder budget, men anlægget kunne altså have kostet mindre. Bygherren kunne have sparet penge. Konsekvensen af en overdimensionering er 'kun', at det anlagte har længere levetid.

En underdimensionering holder også budget, men konsekvenserne er på sigt langt mere katastrofale. Anlægget kan have betydelig kortere levetid end forventet. I ekstreme tilfælde kan anlægget være helt fejldimensioneret og blive kørt i stykker efter endog meget kort tid.

I alle tilfælde er det en rigtig god idé efter afrømning af planum at gå ud med sin PRIMA100 LWD og kontrollere, om den forudsatte bæreevne er til stede. Omkostninger til kontrol er stærkt begrænset i forhold til de omkostninger, der vil være en følge af bristede forudsætninger.

Kontrol af opbygning

Når ingeniøren beregner fx en vejopbygning, kender hun/han også kravene til E_0 -værdi på oversiden af bundsikringslaget og på oversiden af bærelaget. Disse værdier er grundlag for kontrol med LWDen.

Ældre Phoenix-faldlod, den første med flere geofoner, 1981.

Proceduren for måling med LWDen er lige så simpel, som for det ofte anvendte isotopudstyr (og med LWDen er der ingen radioaktiv kilde, som kræver særlige procedurer for håndtering under transport mv.). Man går ud på den aktuelle overflade, laver målingen og aflæser resultatet direkte på PDAen. Hvis den målte bæreevne er som forventet eller over, er alle glade, og entreprenøren kan gå videre med sit arbejde.

Er den målte bæreevne lavere, må der tænkes lidt, for hvor er årsagen? Måleresultaterne kan give et fingerpeg. Kommer deflektionssignalerne tilbage til nulniveauet? Måles der (markant) stigende E_0 værdi på de første 5-6 slag?

Hvis ja, er det højst sandsynligt manglende komprimering, der er problemet. Det løses jo ganske enkelt ved blot at starte tromlen igen.

Hvis nej er problemet i bogstaveligste forstand dybere. For da er vi sikkert tilbage på et planum, der ikke holder det forudsatte E_0 -modul. Det er dyrt at reparere, når der er kørt bundsikring på. Det er dog bedre at erkende problemet, før der også køres stabilt grus på!



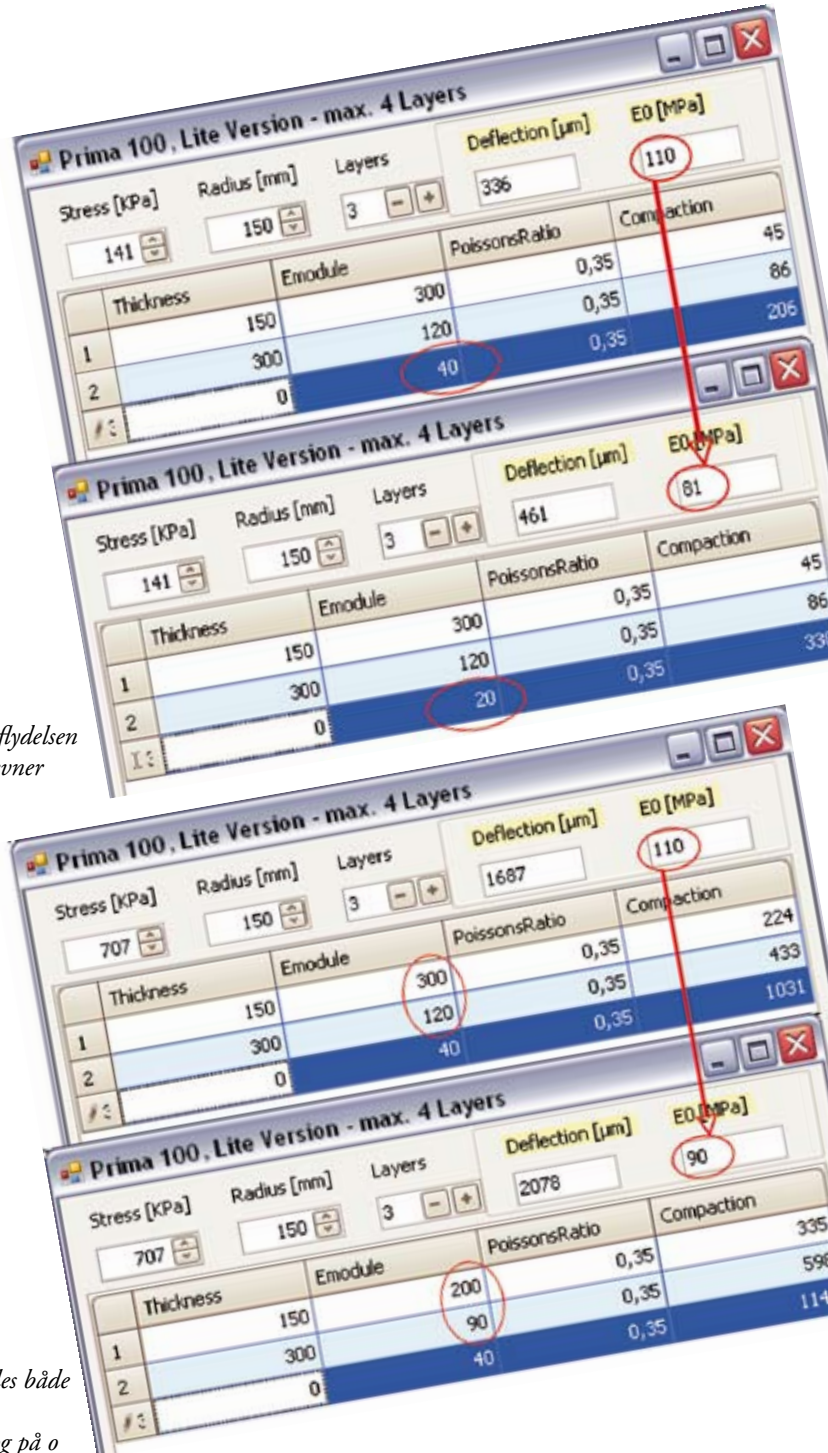


PRIMA100 LWD hus. Vi kan se bundpladen og vejcellen. Geofonen er monteret centralt i huset.



PRIMA100 LWD transporteres fra målepunkt til målepunkt på trolley.

RoSyCompaction beregning viser indflydelsen fra forskellige bæreevner på planum.



Kontrolmåling på opbygning, der måles både på oversiden af bundsikringslaget og på oversiden af bærelaget.

Som det fremgår, så er det en god idé at kontrollere E_0 på alle lag.

Kontrol af råstofkvaliteten

Årsagen til en manglende bæreevne kan imidlertid også være for dårlig råstofkvalitet.

Når ingeniøren sidder og regner, forudsætter hun/han nogle materialeegenskaber. For bundsand vil man i beregninger typisk anvende et materiale E-modul på 100-150 MPa. For stabilt grus anvendes der typisk værdier på 300-350 MPa.

Holder disse værdier ikke ude i virkeligheden, får vi et virkeligt problem.

Vi har set eksempler på målinger af materiale E-moduler (E_m -værdier) på bundsikringslagssand, der lå væsentligt under 100 MPa

og på stabilt grus under 200 MPa. Hvis entreprenøren har indbygget dette materiale, og ingeniøren har beregnet med 120 MPa hhv. 300 MPa, ja, så kan tromle- eller vibratorføreren køre over belægningen aldrig så mange gange. De forudsatte E_0 -værdier vil aldrig blive opnået, hverken på oversiden af bundsikringslaget eller på oversiden af bærelaget.

Det er der to kommentarer til:

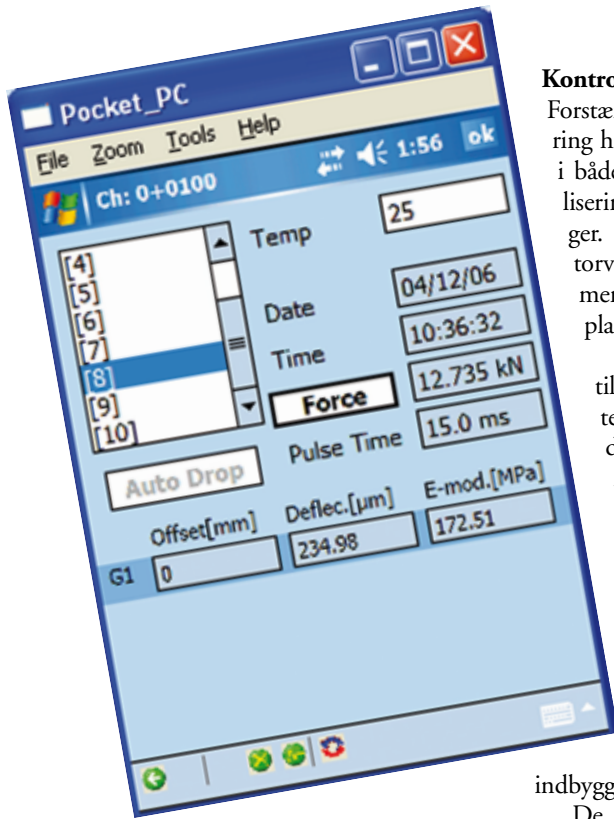
Den ene er, at ved anlægsopgaver, hvor bæreevnen er vigtig, kan det være en rigtig god idé at anvende PRIMA100 LWD til at kontrollere og stille krav til råstoffet. Entreprenører (og bygherrer) bør gøre det, før råstoffet købes i grusgraven. Der kan spares mange ærgrelser og penge ved at være på

forkant og udføre LWD-målinger.

Den anden kommentar har med den manglende direkte korrelation mellem komprimeringsgrad og E_0 -værdi at gøre. Et materiale med dårlig bæreevne kan sagtens have gode komprimeringssegenskaber og visa versa. Men når råstoffet anvendes til anlægsopgaver, er komprimeringsgrad og bæreevne ligeværdige vigtige egenskaber.

Det er naturligt, at der hidtil er fokuseret meget på komprimeringsgrad, også som vikarierende krav til bæreevne-måling, eftersom isotopudstyr siden midt 1980'erne har gjort det meget behændigt og omkostnings-effektivt at måle komprimeringsgraden.

Før man begyndte at bruge isotopudstyr, var det arbejdskrævende at udføre både



Skærbilledet på PDA'en – alle målte data samt resultat vises straks.

Kontrol af kalkstabilisering

Forstærkning af planum vha. kalkstabilisering har over de sidste få år vundet indpas i både store og små projekter. Kalkstabilisering er velegnet på lerholdige aflejringer. Metoden er bl.a. anvendt ved motorvejsprojekterne på Fyn og Lolland, men også af private bygherrer på store pladser, typisk ved transportterminaler.

Den simple, men vigtige, grund til at bruge det lette faldlod er at eftervise effekten af stabiliseringsarbejdet. Overflade E-modul (E_0 -værdier) kortlægges på planum før og efter stabilisering.

Reduceret faldhøjde

Ved opgaver i forbindelse med kalkstabilisering og generelt i forbindelse med opgaver på svage leraflejringer, må vi ofte udnytte, at vi kan reducere faldhøjden.

Det er kun muligt, fordi vi har den indbyggede vejecelle.

De underlag, som skal kalkstabiliseres, har ofte meget lave overflade E-moduler – under 20 MPa. Hvis vi lod loddet falde fra fuld højde på dette underlag, ville geo-

nytte mange faldhøjder og derved mange spændingsniveauer. På PRIMA100 LWD er der på faldstangen markeret $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ og fuld faldhøjde. Derfor er det nemt systematisk fx at anvende disse 4 faldhøjder, startende med den lave faldhøjde.

For friktionsmaterialer vil vi ofte se en positiv afhængighed. Det vil sige, at overflade E-modulet stiger med stigende spænding. Kohæsionsmaterialer er mere komplicerede, da de oftest først vil falde med stigende spænding og derefter stige med stigende spænding.

Derfor er det, som beskrevet i den danske vejledning, vigtigt at opgive, hvilket spændingsniveau der er målt med. Ligesom det også anbefales, at der bruges en spænding, som kan sammenlignes med den spænding, som den fremtidige trafikbelastning udsætter vejen/pladsen for.

Kendskabet til spændingsafhængigheden giver ingeniøren et værktøj til at optimere opbygningen. Uden denne viden kan der ske fejl i optimeringsberegningen.

Er missionen lykkedes?

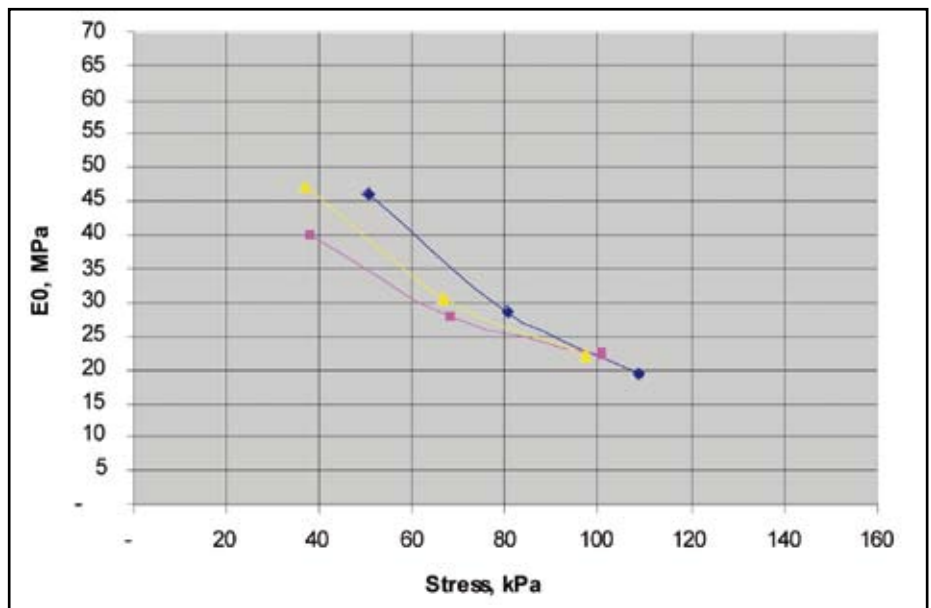
Hvis missionen er lykkedes, sidder læseren nu med et billede af, som vi nævnte i indledningen, at det ingeniørmæssigt såvel som

Proctor-indstampninger og sandefterfyldningsforsøg, som eksempelvis statisk pladebelastningsforsøg.

Der er imidlertid ingen teoretisk eller generel empirisk sammenhæng mellem bæreevne og komprimeringssevne og dermed heller ikke mellem målt overflade E-modul (E_0) og målt komprimeringsgrad. Det har vi hidtil lukket øjnene lidt for.

Netop heri ligger incitamentet til at måle både bæreevne og komprimeringsgrad i forbindelse med anlægsopgaver. Det er en rigtig god idé at have styr på begge størrelser.

Rådet til entreprenører (og bygherrer) er: Stil krav til materialet, før det købes i enorme mængder.



Den negative afhængighed, som er karakteristisk for mange lerholdige aflejringer, ses tydeligt. Grafen kan enten bruges til at aflæse minimumsbæreevnen eller til at aflæse bæreevnen ved et givet fremtidigt spændingsniveau. Det er et konkret valg, hvilken værdi ingeniøren vil indsætte i sine beregninger.

fonen, som måler deflektionen, overskride sit arbejdsområde (0-2200 μ m). Ved at reducere faldhøjden holder vi os inden for arbejdsområdet og måler fortsat korrekt.

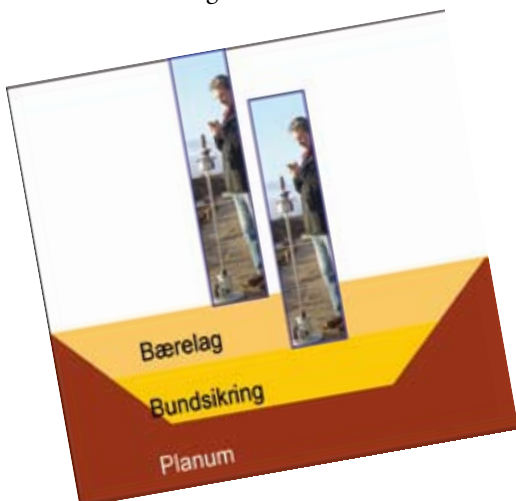
Underlagets spændingsafhængighed – mange faldhøjder

For mange typer underlag gælder, at det målte overflade E-modul er afhængig af faldhøjden. Det vil sige, at E-modulet er afhængig af den overførte spænding. Spændingsafhængigheden fastlægges ved at be-

økonomisk er en fordel at have styr på bæreevnen på bogstavelig talt alle niveauer.

Det fremgår forhåbentlig også, at det er vigtigt at bruge det danske faldlod med den indbyggede vejecelle, og at der er mange tilfælde, hvor det er væsentligt at bruge LWD. Det giver i alle tilfælde korrekte målinger.

Endelig – som det er nævnt i et enkelt afsnit – er det helt optimale at kombinere bæreevne målinger med målinger af komprimeringsgrad. På denne måde er vi sikre på at undgå bædesætninger og sammenbrud af underlag. ■



RoSyCompaction-beregning der viser indflydelsen fra godt og dårligt råstof.