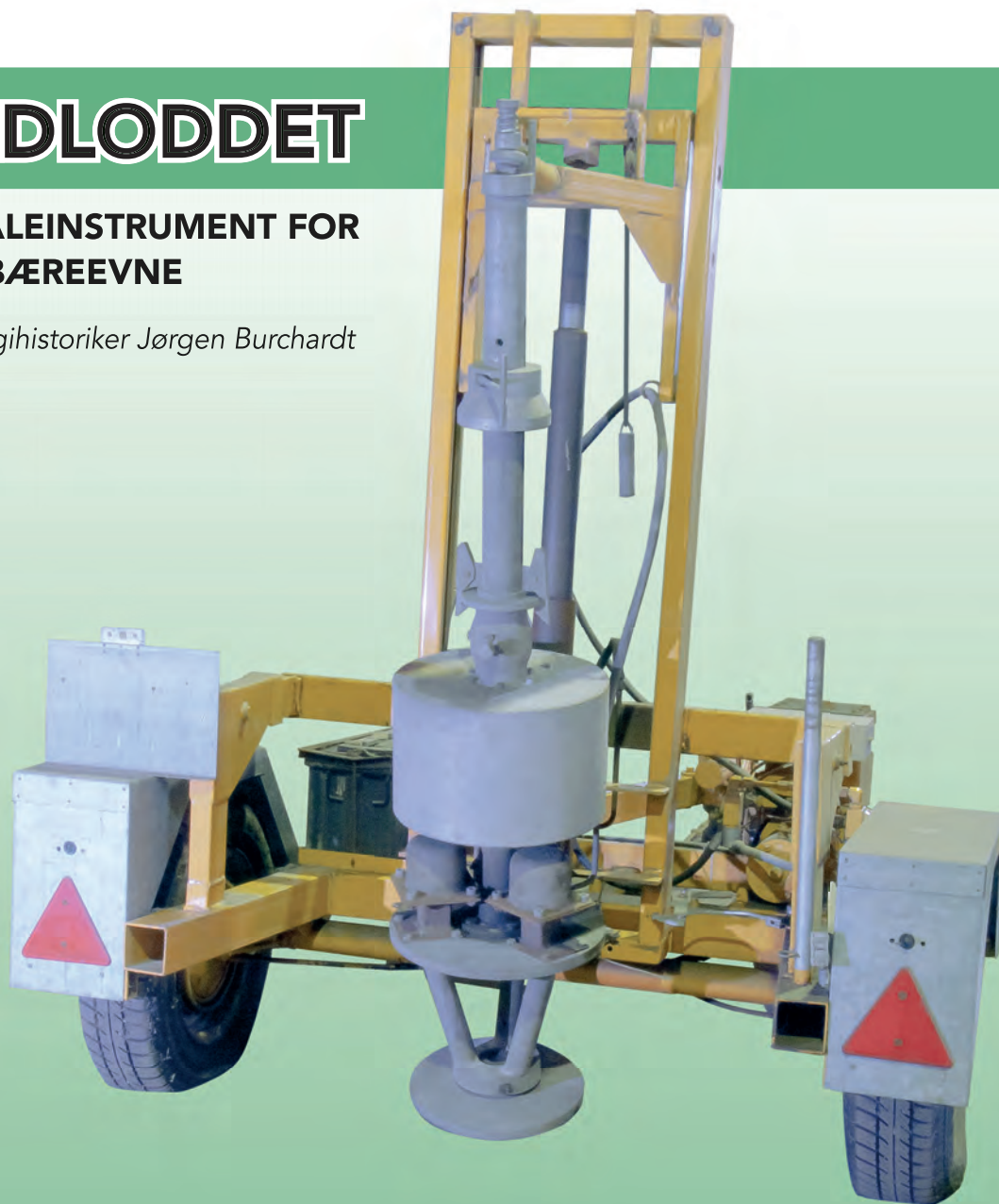


# FALDLODDET

– ET MÅLEINSTRUMENT FOR  
VEJES BÆREEVNE

*af teknologihistoriker Jørgen Burchardt*



**E**ffektive måleinstrumenter er nødvendige ved al produktion. I vejsektoren er de grundlaget for at udvikle og vedligeholde veje mest økonomisk. Dette er en teknologihistorie omkring en af sektorens vigtige instrumenter, faldloddet, som var blandt de genstande, som Danmarks Tekniske Museum overtog, da Danmarks Vej- og Bromuseum blev nedlagt i 2012. Artiklen fortæller samtidig om et enestående godt samarbejde mellem dansk og international forskning, offentlige myndigheder og det private erhvervsliv, som har bragt små eksport-succeser på området.

### Vejmåling

En vej skal kunne holde i mange år, fx planlægges en motorvej til at kunne holde i 20 år. Lokale forhold eller dårlig konstruktion kan mindske levetiden væsentligt. Samtidig kan øget trafik slide vejene betydelig hurtigere end planlagt. Derfor udføres jævnlige undersøgelser og målinger af vejes tilstand for at kortlægge de forskellige vejstykkers langsigtede nedbrydning. Sideløbende måles andre forhold som trafikken mængde, køretøjernes type og vægt. Viden om vejenes nutidige og forventede fremtidige tilstand er vigtig for at kunne lægge plan for vedligeholdelse og genopbygning. Målinger gør det samtidig muligt at opstille objektive krav, som entreprenørerne skal opfylde ved nybygning og reparation. Vejmyndighederne har således et redskab i hånden for at kunne opstille normer og minimumstandarder.

Standarderne kunne oprindeligt være forskellige landet over, hvor vejmyndighederne i de forskellige byer og amter administrerede vejene forskelligt. Fra 1943 begyndte en egentlig standardisering på alle

*Foto på side 50:*

*Danmarks Tekniske Museum modtog dette faldlod, da Danmarks Vej- og Bromuseum blev nedlagt og dets genstande skulle reddes. Når loddet på målemaskinen var faldet ned, kunne vejens bæreevne beregnes efter målinger. Dette er et af de første kommercielt anvendelige faldlod leveret af firmaet Phønix ca. 1968. Loddet kunne lægges ned på traileren under transporten. Faldlod er senere blevet forfinet både mekanisk og elektronisk. Det har fået et internationalt gennembrud, hvor danske producenter er førende. Foto: Danmarks Tekniske Museum.*

TAK

*Jeg takker Hans Jørgen Ertman Larsen og firmaerne Grøntmij og Greenwood Engineering for hjælp med oplysninger og kommentarer. Eventuelle fejl er dog alene mit ansvar.*

### Det første måleinstrument

Allerede i Vikingetiden anvendtes redskaber til at kontrollere vejes konstruktion. Fra Norge kender vi "baugreid", som skulle kontrollere, at vejene mellem byerne holdt en bestemt minimumsbredde. De ansvarlige skulle sørge for, at der ikke voksede træer på vejen, og det blev kontrolleret ved et ret simpelt instrument. Det var en lanse på 8 alen (5 meter), hvor der var bundet en vidjehank omkring lansens spids og en anden hank om den anden ende. En bonde skulle ride midt på vejen med spyddet foran sig på tværs over hesteryggen, og for hvert træ, der rev en hank af skaftet, skulle de ansvarlige betale en bod på én ørtug sølv til kongen. Reglen er beskrevet i kong Magnus' Landslov fra 1274/76, men redskabet har utvivlsomt været benyttet tidligere og været omtalt i de lokale love, som ikke er bevaret i skriftlig form. Antagelig har instrumentet tilsvarende været anvendt i Danmark.<sup>2a</sup>

områder, idet publikationen "Vejregler" med undertitlen "Normer for anlæg, udvidelse og ombygning af veje, gader og stier" udkom for første gang. Nu kunne Ministeriet for Offentlige Arbejder håndhæve standarder over for den statsstøttede del af det decentraliserede vejvæsen.<sup>1</sup> Første udgave af reglerne fyldte kun 37 sider, og mens der var normer for vejenes dimensionering, manglede der normer for, hvorledes belægning og befæstigelse skulle udføres. Det blev der rådet bod på i 1955, hvor der blev udgivet en supplerende bekendtgørelse. Siden er reglerne blevet ændret og udvidet adskillige gange.

Specielle omstændigheder kan forårsage forandringer. Til eksempel blev asfalt voldsomt dyrt under oliekrisen i 1970'erne, hvorfor nogle veje i de år kun blev dimensioneret til at holde i 10 år. Enkelte af disse veje viste imidlertid allerede efter 7 år mange skader og sporkøring. En nærmere analyse viste, at beregningerne for dimensioneringen havde været korrekte, men at det var den øgede trafik, som havde slidt vejen.<sup>2</sup>

### Tung vægt ødelagde veje

De ansvarlige for vejene har altid været opmærksomme på køretøjernes vægt i forhold til vejenes bæreevne. Tidligt kunne man se, at tunge køretøjer ødelagde vejene mere end lettere køretøjer. Man behøvede ikke at lave forsøg, men kunne direkte se de kedelige resultater af tunge hestevogne. Allerede i 1700'tallet blev der iværksat indskrænkninger over for vægt. I 1797 blev der sat afgift i Frankrig efter antallet af heste og derved indirekte efter vægten af køretøjet. Man fandt dog også ud af, at brede hjul ødelagde vejene mindre end smalle hjul. Derfor indførte forskellige lande regler om mindste fælgbredde for hestevogne. England gennemførte en regel i 1773, og Frankrig kom med i 1797. Denne lov er sikkert ikke blevet overholdt, for i 1804 blev den skærpet, hvorefter syndere fik deres vogn slået i stykker. Herhjemme kom der i 1848 regler for vogne over 1.750 kg på de sjællandske hovedveje, som skulle have bestemte store og brede fælge.<sup>3</sup>

Da bilerne for alvor kom frem efter år 1900, ødelagde de nye køretøjer selvfølgelig også vejene. I takt med at motorerne blev kraftigere og kunne trække tungere køretøjer, blev der også for dem indført skrappe restriktioner. I de første mange år siden 1903 kunne man kun mod dispensation køre på andet end de store landeveje, og da bivejene blev åbnet for bilkørsel i 1913, måtte bilerne ikke veje mere end 450 kg.<sup>4</sup> I 1921 begrænsedes bilernes egenvægt og deres vægt med last. De måtte herefter maksimalt veje 4 tons og have en total vægt på 8 tons. Vægtgrænserne blev dog hævet, efterhånden som vejene kunne tillade det, og grænserne blev lagt i forhold til akseltryk og de enkelte hjuls tryk.<sup>5</sup>

### **Forsøgsveje gav indsigt**

De tungeste køretøjer kunne imidlertid ikke køre med pneumatiske dæk, hvorfor de kørte med faste ringe, som sled ekstra meget på vejene. Hvor meget de sled, var man ikke klar over, men man etablerede et storstilet forsøg, som den opmærksomme læser kan huske beskrevet i museets årbog fra 2006. Ved Roskildevej ved København førte man i årene 1926-1938 trafikken gennem tre sluser til hver sin vejbane. Hver bane bestod af forskellige vejkonstruktioner, således at man fik en enestående mulighed for at se, hvorledes henholdsvis hestekøretøjer, køretøjer med faste ringe og med pneumatiske ringe sled på forskellige vejbelægninger.<sup>6</sup>

Datidens dominerende vejbelægning var den makadamiserede vej med stenlag til befæstigelse. Den bestod af et lag af skærver med ensartet størrelse i et ofte 5-10 cm tykt lag oven på et bundlag. Laget blev tromlet til en slags tæppe af sammenlåste skærver, og til sidst tromledes skarpkantet sand ned i stenlaget for at holde stenene fast. Herved fik man en vejbelægning, som samtidig tillod vandet at blive drænet ud i grøfterne på begge sider af vejen.

Da de hurtige biler begyndte at køre på vejene, hvirvlede gummi-hjulene det øverste sandlag væk. Vejbyggerne måtte derfor udvikle metoder til at beskytte overfladen. Den blev sprøjtet med tjære eller



*Ingeniør Jes Mogens Kirk (1918-2006) var som leder af Asfaltindustriens Vejforskningslaboratorium en central person i udviklingen af en nordisk tradition for dimensionering af vejbyggeri. Portrættet er fra 1962. Kirk udviklede formler, som viste sig meget anvendelige ved konstruktion af veje, og som indirekte lå bag en eksportindustri for specialmåleudstyr. Foto: Asfaltindustrien.*

flydende asfalt, hvilke løste problemet for en tid. Senere blev konstruktionen yderligere forbedret ved at blande asfalt i det øverste lag. I 1930'erne kom tæppebelægning af fast asfalt, som ikke alene beskyttede sandet, men samtidig forhindrede vand i at sive ned. Forsøgsvejen viste, at en vej bygget af makadam hurtigt blev ødelagt af biler med massive ringe, mens nedslidningen tog to år med luftringe. Imidlertid kunne vejene holde hele otte år, hvis der kun kørte hestevogne. Det modsatte billede sås ved de overfladebehandlede belægninger, hvor selv cement blev kraftigt påvirket af hestevognene, mens køretøjer med luftringe var mere skånsomme.

### **Den nordiske analytisk-empiriske dimensioneringsmetode**

Vejkonstruktion er ikke en eksakt videnskab, og man troede længe, at vejes holdbarhed blev reduceret efter den samlede vægt, som kørte på dem. Dette er meget langt fra virkeligheden, og det var først i 1950'erne, at man for alvor fik brugbare teorier om vejes ødelæggelse. På basis af amerikanske forsøg i 1956-1958 kunne man se, at vejbelægninger blev nedbrudt i forhold til akseltrykket i 4. potens. En lastbil på 12 tons havde ifølge disse nye teorier cirka samme ødelæggende virkning som 160.000 små personbiler. De øverste slidlag bidrager ikke til vejenes bæreevne, og for at veje kunne konstrueres til tungere køretøjer, måtte man bygge nye typer befæstigelser. Nederst lægges ubundne lag af sand, som sammen med underbunden optager lodrette trykspændinger. Øverst lægges lag med bindemiddel til at holde dele som sten sammen, så laget kan modstå vandrette træk.

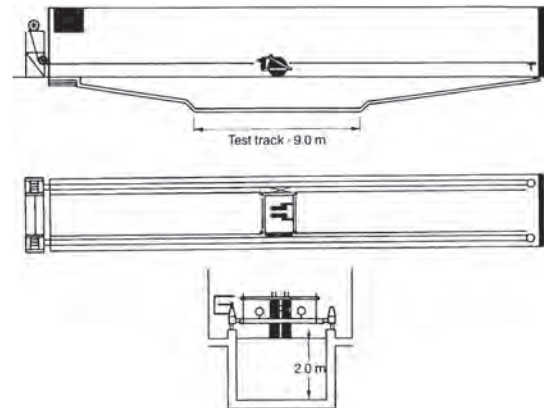
I 1950'erne ønskede erhvervsliv og politikere, at vejene skulle kunne bære fremtidens store og tunge lastbiler, og derfor blev der behov for at kunne finde ud af vejenes bæreevne, og om hvordan man bedst konstruerede stærke veje. Der skete i de år en udvikling af den teoretiske forståelse af veje, hvor Danmark var med til at skabe en egen nordisk videnskabelig tradition. Teorien var oprindeligt baseret

på i bogstaveligste forstand grundforskning udført af den franske matematiker og fysiker Joseph Valentin Boussinesq (1842-1929). Han havde udviklet teorier om hydrodynamik og vibrationer, og det var hans formler for trykspredning under bestemte forudsætninger, som nordiske forskere byggede videre på til at udvikle en analytisk-empirisk dimensioneringsmetode.

Den ene bidragsyder var den svenske civilingeniør Nils Odemark (1899-1989). Hans forskning ved Statens väginstitut i Sverige om vejes elasticitetsegenskaber resulterede i slutningen af 1940'erne i tilnærmelsesformler for "ækvivalente tykkelser", hvorved bærelagets optimale tykkelse kunne beregnes.<sup>7</sup> Herhjemme arbejdede ingeniør Jes Mogens Kirk fra Asfaltindustriens Vejforskningslaboratorium videre med disse teorier for at kunne opstille branchens regler for dimensionering af belægninger. Han havde samtidig et stort empirisk materiale at bygge videre på fra det nævnte amerikanske forsøg.<sup>8</sup> Kirk udgav sin første artikel i 1961, og efter en række rapporter i 1971 førte det til principperne for en nordisk tradition, som lejlighedsvis kaldes 'Kirk/Odemarks principper'.<sup>9</sup> Den nordiske tradition bestod i at udforme formler, som tilnærmelsesvis kunne benyttes til at beregne de aktuelle spændinger og tøjninger i en vejbefæstigelse.<sup>10</sup> Hidtil havde vejbyggere været henvist til store tabelværker baseret på empiriske undersøgelser som fx publikationen "Thickness Design" fra det amerikanske The Asphalt Institute, men nu kunne man ud fra enkelte måleresultater beregne en vejs bæreevne.<sup>11</sup>

Kirks tilnærmelsesformler blev løbende kontrolleret. Til eksempel udførtes en række forsøg på en vejstrækning ved Holsted 1970-1974, hvor man nøje kendte vejens konstruktion og samtidig havde nedgravet målesonder for at kunne sammenligne deres målinger af påvirkninger efter overkørsler af vogne med kendte akselvægte med målinger udført med statiske pladebelastninger og med faldlod. Disse forsøg gav forbedringer af de anvendte formler.<sup>12</sup>

En lang række forsøg kunne siden 1973 udføres på en vejprøvemaskine med måleapparaturer under kontrollerede former i et stort laboratorium på DTH (fra 1994 DTU), som Vejdirektoratet havde halvpart i.



*Forsøgsanlæg var vigtige, når der skulle udvikles teorier om vejes konstruktion og slitage. Tegningen viser vejprøvemaskinen installeret i bygning 117 på DTU. Maskinen kan illudere, hvorledes 10.000 lastbiler i døgnet belaster en vej. Den var internationalt set enestående ved sin etablering i 1973, idet vejens klima kunne styres. Tegning: Ullidtz og Busch 1979.*

Der blev ganske enkelt bygget et stykke vej på 9 meter længde, 2½ meter bredde og 2 meter dybde. Ovenpå kørte et belastet hjul frem og tilbage for at illudere et lastbilhjul med en belastning på op til 6½ tons. I løbet af et døgn kunne vejstykket belastes ca. 10.000 gange, hvilket svarede til 30.000 passager af 10 tons aksler. I lighed med forsøget i Holsted var der nedlagt trykdåser til at måle trykket nede i vejen.<sup>13</sup> Det specielle ved dette måleinstrument i forhold til tilsvarende i udlandet var, at hjulet ikke kørte i rundkreds, og tillige kunne vejens klima styres. Således kunne vandstanden reguleres til at illudere højt eller lavt grundvand, og samtidig var maskinen indbygget i et isoleret rum, hvor temperaturerne i klimakammeret kunne ændres fra minus 10 °C til plus 40 °C.

Modellerne – og dermed reglerne for dimensionering – er løbende blevet justeret i forhold til belastninger fra de nye tungere køretøjer og i forhold til nye metoder for vejbygning. Den nye dæktype for lastbiler, supersingledækket, betød til eksempel omkring 1990 nye belastninger med efterfølgende kraftigt forøget sporkøring, hvorfor reglerne for dimensionering skulle ændres.

### Måling af bæreevne

Tunge lastbilers hjul belaster veje meget kraftigt, og deres påvirkning har man ønsket at kunne måle. En af metoderne består i korthed i at trykke en plade med samme belastningsflade som et tvillinghjul ned på en vej, og pladens nedsynkning måles med måleure. Belastningen kunne meget bekvemt bestå af et tilstrækkelig tungt køretøj. Måleudstyret blev bygget ind i køretøjet, således at man kunne måle de forskellige veje rundt om i landet. Man målte i realiteten vejens stivhed, hvilket blev angivet med enheden 'e-modul'. Ved at fjerne vejens øverste lag, kunne man måle e-modulet for vejens næste lag. Når alle lag var målt, blev det muligt at beregne vejens levetid under en forventet belastning af et givet antal tunge køretøjer.

Den første målevogn skulle være så stor som muligt, og Statens Vejlaboratorium valgte i 1957 at indbygge måleinstrumenterne i en



*Büssing målevognen var en ombygget bus. Her ses den med støttebenene slået ud og klar til at måle. Foto: Banke.*

bus af det tyske fabrikat Büssing (firmanavnet blev køretøjets kæle-  
navn). Det tog ret lang tid at udføre en måling, for køretøjet skulle først  
hæves op på støtteben inden måleudstyret kunne indstilles og måling  
foretages. Desuden skulle vejen graves op, så der kunne udføres en  
måling på vejens næste lag. For hvert lag skulle trykpladen være større,  
indtil det sidste lag, som kunne være i størrelse 1 x 1 meter. Det var  
derfor kun muligt at udføre to målinger om dagen.

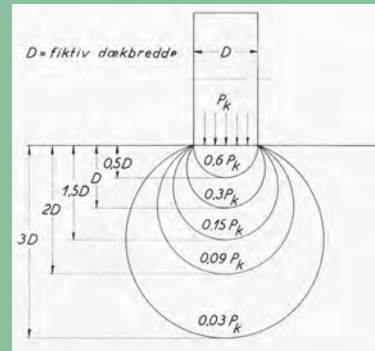
En bus var ikke særlig mobil, og i 1960'erne anskaffede vejlabo-  
ratoriet sig sin anden vogn, som fik kælenavnet "Vikingen". Den var  
mindre og mere terrængående, således at det også blev muligt at  
udføre målinger på områder, hvor der endnu ikke var bygget vej.

I 1982 udviklede vejlaboratoriet endnu et køretøj til at kunne måle  
ikke-faste overflader. Måleudstyret blev installeret i en Mercedes Uni-  
mog med to kraftige jernvanger bagtil, mens belastningspladen hang  
i en jernramme. På grund af de store mængder jern blev køretøjet  
kaldt "Ironside" efter en aktuel TV-serie.<sup>14</sup>

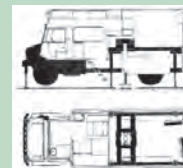
### Faldlod udvikles

Målingerne havde hidtil været udført ved et fast statisk tryk, men  
man ønskede i midten af 1960'erne også at kunne udføre dynami-  
ske belastninger for at kunne følge vejens nedsænkning i forhold til  
stigende belastninger. Man ønskede at måle belastningen fra et hjuls  
passage, hvilket målevognene ikke kunne levere.

Løsningen var en anden teknologi: faldloddet, på engelsk *falling  
weight deflectometer*, FWD. Det centrale i faldloddet er et lod, som  
kan hæves og via fjedre faldt ned på en cirkulær plade igen svarende  
til kontaktarealet under et tvillinghjul på en lastbil. Faldloddet findes  
i flere størrelser, hvor en typisk vægt er 150 kg og en faldhøjde på  
40 cm. Det svarer til påvirkningen fra et 5 tons tvillinghjul med en fart  
på 40-60 km./t.<sup>15</sup> Det blev senere standard, at faldloddet havde en  
kraftmåler indbygget, således at det kunne kontrolleres, at loddet  
ramte pladen med den rette vægt og derved gav en eksakt måling.  
Princippet for faldlodsmåler blev oprindeligt udviklet af M. Bretonnière

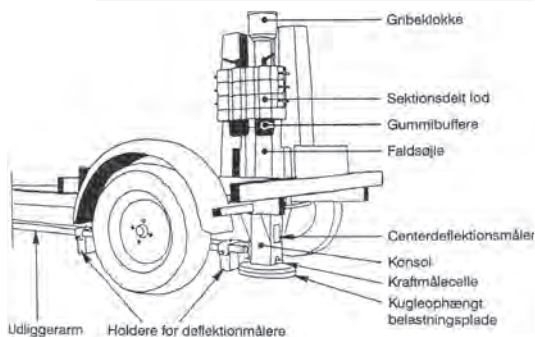


Trykket fra et dæk forplanter sig som bøl-  
ger gennem en vejs forskellige lag. Når  
de enkelte lags bæreevne skulle testes,  
måtte trykpladerne gradvis blive større, jo  
dybere lagene lå.



Tegning af målevognen "Ironside" for  
måling af bæreevne gennem statisk tryk-  
måling. Tegning: Banke.





*De første generationer af faldlod var rimelig simple konstruktioner. Her ses en tegning af en af de første modeller fra Dynatest (gengivet fra Bent Thagesen: Veje og stier).*

på Laboratoire Central des Ponts et Chaussées i Paris.<sup>16</sup> I 1963 publicerede han en artikel om faldloddet, men laboratoriet fortsatte ikke udviklingen, da det prioriterede udviklingen af et deflektometer højere.<sup>17</sup> Docent Axel O. Bohn på DTH fik skaffet et faldlod til Danmark for at undersøge det franske projekt nøjere. Der skete i de år en parallel udvikling i Frankrig, Danmark og Sverige, og det lykkedes til sidst Statens Vejlaboratorium i samarbejde med DTH at udvikle en fungerende prototype, der imidlertid havde mange negative sider. Den var ikke særlig let at betjene eller transportere, og den kunne også være farlig at betjene, da loddet bevægede sig tæt ved operatørens hoved.<sup>18</sup>

Udviklingen skete parallelt hos det jyske vejmateriefirma Phønix i Vejen under civilingeniør J.B. Villadsens ledelse, hvor man konstruerede en serie faldlod i mere handy og praktiske udformninger. Den første produktion af et kommercielt brugbart faldlod startede i 1968 – antagelig verdens første (produktionen blev senere overtaget af firmaet Carl Bro, da dele af Phønix blev afhændet i 1999; i 2006 overtaget af Grontmij).<sup>19</sup> Villadsen deltog på det tidspunkt i en studiegruppe ledet af professor Ravn fra DTH, hvor faldloddet blev introduceret.

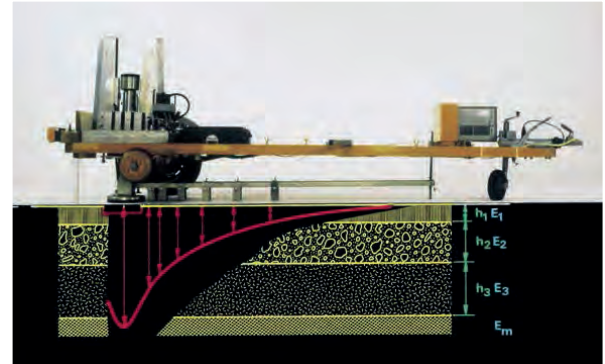
Den første model blev betjent manuelt og transporteret på en lastbil, men kort efter blev der udviklet en trailermonteret model, som blev en kommerciel succes med 65 solgte eksemplarer det første år.<sup>20</sup> I 1975 udvikledes en ny konstruktion, hvor loddet blev hævet ved hjælp af en hydraulisk håndpumpe, mens tårnet kunne lægges ned på traileren under transporten. Dette faldlod med et enkelt målepunkt blev senere udviklet i en mindre, håndholdt udgave som et nyttigt redskab til at kontrollere komprimeringen af fx sand i fundamentsrender og bærelag ved brolægning. Det kan også undersøge midlertidige veje som til eksempel ved opstilling af store tunge vindmøller.

## Slut med at grave

De første faldlod med centermåling kunne ikke fortælle meget om alle lag i vejen. Derfor skulle der stadig graves lag af for at måle alle vejens lag. Statens Vejlaboratorium havde anskaffet to eksemplarer i 1970, men mente at systemet kunne forbedres. Der blev arbejdet videre, og den unge studerende Per Ullidtz undersøgte i 1973 faldlod og hjulhastighed baseret på den nævnte forsøgsvej i Holsted og forsøgsanlægget på DTH. Dette resulterede i en ny type faldlod, som Ullidtz og andre forskere kunne levere via det nystartede firma Dynatest og i samarbejde med amerikanske vejmyndigheder. Den store leverandør af vejbygningsmateriel, Shell, havde siden 1970 forsket i at måle nedbøjningen ved en hjulpassage, og det lykkedes i 1977 for Dynatest at konstruere et brugbart faldlod, model 7800, hvor en føler – en geofon – skulle måle bøjningerne. Geofonen skulle manuelt bevæges på vejens overflade i forskellig afstand fra, hvor faldloddet lavede sit ”bump”.

I 1979 kunne Dynatest med deres model 8001 levere det første faldlod med 6 samtidige målinger via geofoner på en fast bjælke til at supplere målingen i centeret.<sup>21</sup> Phønix leverede samme funktion ved deres ML5000 model i 1981, og i 1984 lanceredes model ML10000, som kunne klare en vægt på 120 kN. De hidtidige en-akslede modeller blev i 1990 erstattet af den to-akslede PRI model serie. ML-serien blev senere udvidet med en MLY-serie, hvor løftesystemet var baseret på hydraulik i stedet for elektriske løfteaktuatorer.

Dynatest udviklede tilsvarende større modeller, hvor firmaet i 1987 kunne levere model 8081 med sin største påvirkning på op til 240 kN beregnet for landingsbaner for tunge fly.<sup>22</sup> Phønix introducerede deres tunge måleapparat med PRI-serien i 1990, som havde mellem 6 og 9 geofoner, og hvor loddets påvirkning kunne justeres mellem 7 og 250 kN. Systemerne kunne leveres monteret på en trailer, men de kunne også være indbygget i en varevogn eller lastbil. Produktet er senere blevet videreudviklet, og kan i dag leveres i model PRIMAX3000 med op til 300 kN for målinger svarende til helt store fly som Boeing 777 eller Airbus 380 med en vægt på 560 tons. Der er samtidig



Skematisk billede af princippet ved et faldlod. Geofonerne på den vandrette stang registrerede refleksionerne (rød farve), når faldloddet til venstre i instrumentet faldt mod vejen. Bølgerne blev kastet tilbage fra de enkelte lag, og hvis man kendte deres tykkelse, kunne man beregne lagenes bæreevne. Ill.: Statens Vejlaboratorium.



Faldlod kan købes installeret på en selvstændig trailer eller som her indbygget i et køretøj. Modellen er Primax fra Carl Bro. Foto: Grontmij.



Efterhånden som flyvemaskinerne blev tunge, måtte prøvemaskinerne følge med landingsbanernes konstruktioner. Her ses en Primax 3000 leveret af Carl Bro / Grontmij, som kunne måle hjulbelastninger på op til 300 kN (30 tons) svarende til jumbojet som Boeing B777-300 og Airbus A380-800F. Foto: Grontmij.

indbygget ny elektronik for udveksling via Bluetooth og stedsbestemmelse via GPS. Endelig kan der i PRIMAX serien leveres modeller med 18 geofoner eller flere. Elektronikken i Dynatests faldlod blev efterhånden meget avanceret, hvilket det konkurrerende firma Phønix søgte at overgå ved at købe know-how fra Teknologisk Institut, så firmaet i 1981 kunne levere et system med 6 geofoner som svar på Dynatest's model 8001 fra 1979. I 1984 leverede Phønix endnu en ny model, ML10000.<sup>23</sup>

Danmark har stået stærkt ved udviklingen af faldlod. To af verdens fire største leverandører af faldlod er baseret i Danmark: Dynatest og Carl Bro (Grontmij i dag) har samlet 70% af verdensmarkedet, mens de øvrige to store KUAB, Sverige og JILS, USA deler de sidste knap 30%.<sup>24</sup> Det er vigtigt, at faldlod er rigtigt kalibreret, for ellers kunne man let risikere, at forkerte beregninger medførte store udgifter til ekstraordinære undersøgelser og/eller for stort et forbrug af asfalt. Derfor er det nødvendigt, at leverandørerne af udstyr samtidig kan levere en nærmest world wide service for deres brugere eller i det mindste, at der findes rutiner til at indstille apparatet korrekt. Phønix i Vejen var en af de første i verden med en testhal, som kunne kontrollere og kalibrere flere fabrikater af faldlod.<sup>25</sup> For at måleudstyret kan anvendes korrekt, leverer de enkelte leverandører samtidig kurser på ofte en uges forløb for at brugerne kan blive certificeret. De større faldlod har i dag helt op til 18 målepunkter. Udstyret opsamler oplysningerne og opbevarer dem på computer. Efterfølgende kan disse data behandles ved hjælp af specialudviklet software.

### Vejmyndighedernes politik for målinger

Det er ikke unormalt, at en vejmyndighed måler mere end tusinde km vej om året. Det bliver kun en mindre del af den totale vej længde, hvorfor der må prioriteres. En politik kunne til eksempel være hvert år at måle veje, som var ved at være slidt op. Disse målinger kunne vise, om vejene skulle bygges om eller man kunne spare penge ved at bruge vejen et stykke tid endnu. Således har Vejdirektoratet taget

prøver på strækninger med en forventet levetid af befæstigelsen beregnet til 4 år eller mindre. Oprindeligt var der 300 meter mellem hvert prøvested,<sup>26</sup> men man er gået ned til at teste for hver 100/200 meter i hver side af en vej med en forskydning på 50/100 meter mellem de to vejsider. I 1990'erne havde Vejdirektoratet tre faldlod til at udføre dette arbejde.<sup>27 28</sup> Hvis det mest benyttede hjulspor blev fundet i orden, gik man ud fra, at vejbanens øvrige spor også var i orden.

Brugen af faldlod er efterhånden blevet standardiseret gennem standardiseringsorganer som det amerikanske ASTM i lighed med, at nationale vejmyndigheder har beskrevet brugen i tilsvarende beskrivelse af standarder.<sup>29</sup> Det danske Vejdirektoratet har nøjedes med at standardisere sine målinger til 7 målepunkter i 1980; antallet er senere blevet udvidet til 9 målepunkter.

### Ønske om hurtigere resultater

Målinger med faldlod skulle udføres med udstyr, som skulle stå stationært i 2-4 minutter, og hvor vejbanen derfor helt var spærret. Det betød farlige arbejdsforhold, samtidig med at den målte vejs kapacitet blev nedsat i en længere periode. Man havde derfor længe ønsket at kunne måle en vejoverflades bæreevne, mens køretøjet med måleinstrumentet kørte. Hvis et vejstykke viste sig at have en ringe bæreevne, kunne der udføres en mere grundig undersøgelse ved hjælp af et faldlod.

En delvis løsning var at benytte princippet fra et måleredskab, som var blevet brugt under de store forsøg med lastbilers slitage på veje 1952-1954 i USA. Den blev kaldt Benkelman-målemetoden efter den person i de amerikanske vejmyndigheder, som stod for udviklingen.<sup>30</sup> Det var en selvkørende deflektograf, som målte den lodrette nedsynkning af vejoverfladen, når en belæsset lastvogn gav et 8 tons akseltryk på et stykke vej. Instrumentet var indbygget i et stort køretøj, hvor forvognen stod stille under målingen, mens en Benkelman-vægtarm var placeret mellem køretøjets bevægelige tvillinghjul, og hvor et måleur i den anden ende af vægtarmen registrerede tilbagesvinget af



*Det var ikke tilfældigt, at målevognen fra Vejdirektoratet havde store skilte med advarselslys. Det var farligt, når faldlod anvendtes på trafikeret vej, da udstyret skulle stå stille nogle minutter. Faldlodet er en Dynatest 8000 fra 2001. Foto: Hildebrand og Rasmussen 2002.*



vejbanen, når disse hjul kørte. Målemetoden var oprindelig langsom, da køretøjet skulle stå stille ved hver måling, mens vægtarmen blev placeret manuelt mellem hjulene. Metoden er dog simpel og relativ billig, hvorfor den endnu benyttes i mindre velstående lande.

I Danmark ønskede man i 1960'erne at bygge en forbedret udgave af det selvkørende måleudstyr, og man gik i gang på basis af tegninger fra USA. Udstyret skulle placeres på et sættevognstog, hvor en Scania Vabis forvogn drev et mindre elværk med en 30 KVA generator til drift af registreringsudstyr og målebros. Anhængerens havde et målehus i enden mod førerhuset og en "vandrende" målebros i den anden. Under målingen blev målebrosen sænket ned på vejbanen, mens køretøjet



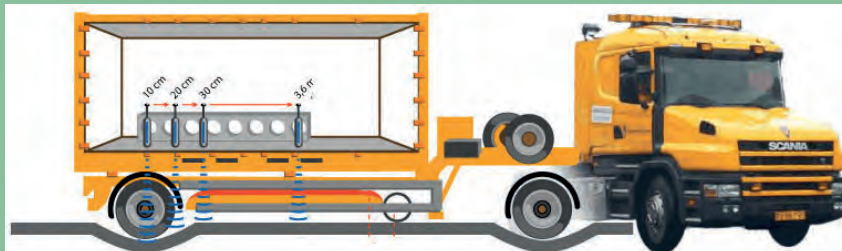
inklusive tvillinghjulene på bagvognen bevægede sig mod broen. Køretøjet var ret specielt, da det blev kortere og længere – mellem 15 og 19 m. – mens det målte. Dets specielle udseende gav det navnet "Græshoppen".

Det tog tid at udvikle køretøjet. I 1971 kunne det tage på sin første prøvekørsel, men først i 1974 var det så stabilt, at der kunne gennemføres regelmæssige målinger. Køretøjet var dog ude for gentagne trafikuheld, men kørte frem til 1984. "Græshoppen" stod altså ikke stille, men kørte med en jævn, langsom hastighed

under målingen. Når målingen var foretaget, blev den lille målebros hævet og trukket frem og sat ned til en ny måling. Dens målehastighed var 1½ km/t med prøver for hver ca. 11 meter af en vejstrækning, og den kunne derfor på en dag kun måle 6-8 km.

Vejdirektoratet ønskede en hurtigere måling, og i 1985 kunne et nyt og forbedret køretøj tages i brug. Målehastigheden kunne sættes op til 6 km/t. Samtidig var bagvognens tvillinghjul gjort drejelige og blev styret automatisk via infrarødt lys, hvorved det blev lettere at måle små og snoede veje.

*"Græshoppen" var et af landets mærkeligste køretøjer. Den fik sit navn, idet dens bagparti kørte frem i ryk, mens forvognen kørte fremad i et jævnt, langsomt tempo. Dens målebros blev lagt på vejen, således at bagpartiets hjuls påvirkninger kunne måles, når de kørte frem. Hjulene stoppede, målebrosen blev ført fremad, og en ny måling kunne foretages. Foto: Danmarks Tekniske Museum.*



Fotomontagen viser, hvorledes højhastighed-deflektografen fungerer. Når køretøjet kører fremad med 50-80 km./t, trykker hjulene med en vægt på 5 tons (svarende til 10 tons akselvægt). Nedsænkningen registreres af Doppler sensorerne. Tegning: Statens Vejlaboratorium.



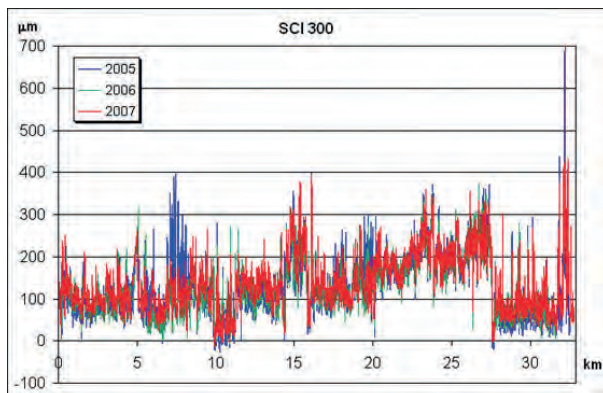
På ladet af deflektografen findes langs vognens højre side en række af Doppler sensorer, mens der i den anden side findes elektroniske komponenter. Bagerst på vognen ses et lille hjul, som måler den kørte afstand. Tegning: Greenwood Engineering.

## Højhastighed-deflektograf

Selv langsomt kørende måleudstyr er farlige i trafikken, og da det nye køretøj kom ud for sit andet alvorlige trafikuheld med en deflektograf forårsaget af påkørsel bagfra af en lastbil (føreren af lastbilen døde ved det sidste uheld), valgte man i 1990 ikke at genopbygge deflektografen.<sup>31</sup>

I alle lande ønskede man at kunne måle med et køretøj under en normal hastighed – ikke mindst på de største og mest trafikerede veje. I Sverige udvikledes et måleudstyr baseret på laserlys, og tilsvarende udviklede Vejdirektoratet, Statens Vejlaboratorium og Greenwood Engineering i fællesskab med statslig erhvervsstøtte i årene 1996-2001 en prototype af et køretøj. Det kunne måle bæreevnen, mens det kørte med en normal hastighed på 90 km/t., hvorfor det blev kaldt High Speed Deflectograph (HSD), på dansk højhastighed-deflektograf (internationalt også kaldet Traffic Speed Deflectograph, TSD, højhastighed-deflektograf).<sup>32</sup>

Anhængerens fra den havarede deflektograf blev genanvendt. Det lange køretøj havde den fordel, at forvognens hjul ikke forstyrrede



Måleresultatet fra tre følgende år af et 33 km langt vejstykke fra en højhastighedsdeflektograf. Det første år er aftegnet med blå farve, det følgende år med grønt og endelig det seneste år med rødt.

Man kan se, at vejens tilstand år for år er blevet en anelse ringere, idet kurverne er forskudt lidt opad. Der er dog udført reparationer omkring 6-7½ km og omkring 20 km., hvor den nyeste røde farve angiver, at vejen er bedre end de tidligere år. Graf: Greenwood Engineering.

målingerne foretaget ved anhængerens baghjul. Målingerne blev foretaget ved laser sensorer af Doppler typen opkaldt efter den østrigske fysiker Christian Johann Doppler, som viste at bølgelængden ved lys, lyd og anden spredning af energi ville foregå i et bestemt faseskift. De første målere havde fire Doppler sensorer, mens de nyeste målere i modellen fra 2013 har 10. Til udstyret hører meget centrale computerprogrammer til behandling af data. I øvrigt kan man benytte et tilsvarende udstyr til at måle jernbaneskinners bæreeevne.

Fra 2005 er de danske veje systematisk blevet målt med trafikfart-deflektografen. Med dette udstyr kunne man jævnlige måle hele landets vejssystem og herved udpege de få mere problematiske vejstykker, som måtte undersøges mere indgående med faldloddet. Med en gennemsnitsfart på 70 km/t kunne det på en arbejdsuge klare at måle 1.750 km, hvorfor de 6.000 km. statsveje i 2002 kunne klares på fire uger og de 20.000 km. sekundære veje uden for byerne kunne klares på 12 uger.

Tidligere havde man på et år målt en tredjedel af statens veje – 1.629 km – med et faldlod, hvilket tog 27 dage og kostede over en million kr. inkl. udgifterne til et advarselskøretøj og analyse og bearbejdning af data. Udgifterne til måling af den samme længde med trafikfart-deflektografen med efterfølgende test af 10 % af den målte distance med faldlod tager få dage og koster omkring 200.000 kr. Teknikken er patenteret af Greenwood Engineering, som sælger udstyret globalt, mens Vejdirektoratet har fået rettigheder til at leje sine køretøjer ud til andre vejvæsener. Således blev 18.000 km vej i Australien målt på 5 måneder.<sup>33</sup>

## LITTERATUR

**Aitken, Thomas:**

*Road Making and Maintenance. A Practical Treatise for Engineers, Surveyors, and Others.*  
London 1900.

**Alavi, Sirous, Jeffrey F. LeCates og Michael P. Tavares:**

*Falling Weight Deflectometer Usage. A Synthesis of Highway Practice.*  
Washington 2008.

**Arnberg, P.W., Å. Holen og G. Magnusson:  
The high-speed road deflection tester.****I: W.R. Stephenson m.fl.:**

*High-speed road monitoring and vehicle dynamics.*  
Cambridge 1992.

**Banke, Jørgen:**

Bæreevnebusser og faldlod/bæreevne (Vejens egenskaber – 2). I: *Dansk Vejtidskrift* 2001, nr. 1, s. 23-24. (a)

**Banke, Jørgen:**

Benkelman-målinger og deflektografer. (Vejens egenskaber – 3). I: *Dansk Vejtidskrift* 2001, nr. 1, s. 30-31. (b)

**Banke, Jørgen:**

Hvorfor ofre så mange ressourcer på at måle. (Vejens egenskaber – 9).  
I: *Dansk Vejtidskrift* 2001, nr. 9, s. 29. (f)

**Bohn, Axel O.:**

Faldloddets historie. I: *Asfalt*, nr. 112, 1989, s. 4-11.

**Bohn, Axel O.:**

The History of the Falling Weight Deflectometer (FWD).  
U.å.

**Bolet, Lars og Jørgen Kristiansen:**

*Vej- og Trafikteknik. Design. Vejbefæstelser.* Institut for Planlægning, Aalborg Universitet, Trafikforskningsgruppen (udkast). 2011.

**Brettonnière, M.:**

Etude d'un Défectomètre à boulet. I: *Bulletin de liaison des Laboratoires Routiers*. 1963, nr. 2, s. 43-50.

**Bruun, Mikkel og Ole Fog (red.):**

*Vi kender vejen.* Vejteknisk Institut i 75 år. 2003.

**Burchardt, Jørgen:**

Vejens bæreevne, hestevogne og bilismens syv gennembrud. I: *Vejhistorie*, nr. 18, 2010, s. 3-14.

**Burchardt, Jørgen:**

Ny teknik skal tøyles og udvikles. Samspil mellem forbud og tekniske forbedringer af lastbiltransport 1900-2000. I: *Årbog for Teknisk Museum* 2006, 2007, s. 40-57.

**Burchardt, Jørgen og Mette Schönberg:**

*Lige ud ad landevejen. Med hestevogn og bil på amternes veje 1868-2006.* Danmarks Vej- og Bromuseum 2006.

**Busch, Christian, Mogens Løvendorf Holst og Asmus Skar Christiansen:**

*Identification and selection of Pavement Performance Models.* NordFou 2010.

**Busch, C.:**

Dansk analytisk belægningsdimensionering - fra Kirk til MMOPP. I: *Trafik & Veje* (11), 2010, s. 36-41.

**Bärenholdt, E., J.M. Kirk og H.J. Ertman Larsen:**

*Forsøgsvejen i Holsted. Supplerende forsøg.*  
Statens Vejlaboratorium 1976.

**Dansk Vejlaboratorium (udg.):**

*Forsøgsvejbanen paa Roskildevej. Resultaterne af forsøgene indtil banens nedlæggelse i foråret 1938.*  
Dansk Vejlaboratorium 1944.

**Dynatest (udg.):**

*Dynatest FWD/HWD test systems. Owner's manual.*  
Dynatest 2008.



**Ertman Larsen, H.J.:**

*The Danish Road Directorate's pavement maintenance system today and in the future.*

1 st North American Pavement Management Conference, 1985.

**Harste, E.:**

Neue dänische Bemessungsdiagramme im Asphaltstrassenbau. I: *Bitumen* nr. 5, 1972, s. 134-137.

**Henia, Mehdi Ould og Robert Braber:**

Falling Weight Deflectometer et déflectographe Lacroix: Comparaison, domaine d'application et perspectives.

I: *Route et Trafic*, 2008, nr. 7-8, s. 18-23.

**Hildebrand, Gregers og Søren Rasmussen:**

*Development of a High Speed Deflectograph.*

Statens Vejlaboratorium 2002.

**Jakobsen, Poul-Erik:**

Brugen af let faldlod.

I: *Dansk Vejtidskrift*, december 2007, s. 10-13.

**Kirk, J.M.:**

Vurdering af befæstelsers bæreevne.

I: *Dansk Vejtidskrift*, årg. 38, nr. 5, 1961.

**Kirk, J.M.:**

*Ækvivalente Akseltryk. I. Tryk på Underbund.*

Asfaltindustriens Vejforskningslaboratorium 1971.

**Kirk, J.M.:**

*Ækvivalente Akseltryk. II. Bituminøse bærelag.*

Asfaltindustriens Vejforskningslaboratorium 1971 (a).

**Kirk, J.M.:**

*Udmattelsesforsøg med Asfaltbeton VII. Temperaturen's indflydelse.*

Asfaltindustriens Vejforskningslaboratorium 1971 (b).

**Knudsen, F. og J.S. Kirk:**

Successful implementation of the Danish pavement management system – BELMAN – abroad. (Paper)

*4 th International Conference on Managing Pavements.* 1998.

**Odemark, Nils:**

*Undersökning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori för beräkning av beläggningar enligt elasticitetsteorin.* Statens Väginstitut 1949.

**Roland Jensen, B. og Vagn Leerskov:**

*Faldlodsmålinger og resultater.* Statens Vejlaboratorium 1986.

**Statens Vejlaboratorium (udg.):**

*Spændingsmålinger i en vejbefæstelse ved Holsted.*

Statens Vejlaboratorium 1973.

**Statens Vejlaboratorium (udg.):**

*Forsøgsvejen i Holsted.* Statens Vejlaboratorium 1976.

**Taranger, Absalon:**

*Magnus Lagabøters Landslov.* Oslo 1915.

**Thagesen, Bent (red.):**

*Veje og stier.* Lyngby 1998.

**Ullidtz, Per og C. Busch:**

*Vejprøvemaskinen på DTH. Indledende forsøg.*

Statens Vejlaboratorium 1979.

*Vejlederen.* Nr. 2, 1990. Vejen.

**Visser, A.F.H.M. og D. Priambodo Koesrindartono:**

Towards a mechanistic analysis of Benkelman beam deflection measurements. I: *HERON*, 2000, vol. 45, nr. 3, s. 177-195.

## NOTER

1. Burchardt og Schønberg 2006, s. 277-278.
2. Bruun 2003.
- 2a. Taranger 1915, s. 141-142.
3. Burchardt 2010.
4. Burchardt og Schønberg 2006, s. 177-178.
5. Burchardt og Schønberg 2006, s. 177-178.
6. Burchardt 2007.
7. Odemark, Nils 1949.
8. Burchardt 2007.
9. Se f.eks. Harste 1972.
10. Kirk 1961, Kirk 1971, Kirk 1971 a og Kirk 1971 b.
11. Busch 2010.
12. Statens Vejlaboratorium 1973 og Statens Vejlaboratorium 1976.
13. Ullidtz og Busch 1979.
14. Banke 2001 (a).
15. Thagesen 1998, s. 293.
16. Roland Jensen og Leerskov 1986.
17. Bretonniere 1963 og Henia og Braber 2008.
18. Bohn u.å.
19. Fra foredrag af Poul-Erik Jakobsen, RoSy/Grontmij 2011.
20. Fra hjemmesiden for Grontmij.
21. Bohn u.å.
22. Dynatest 2008.
23. Bohn u.å.
24. Oplysninger fra Svenske Wikipedia, som dog ikke har reference. Opgørelsen passer dog med oplysninger om markedsandele i USA iflg. Alavi, LeCates og Tavares 2008.
25. Vejlederen 1990.
26. Kapitel 23, Vedligeholdelse af Bent Thagesen, s. 523 (på hjemmesiden Vejbanken, juni 2013).
27. Hildebrandt og Rasmussen 2002.
28. Roland Jensen og Leerskov 1986 nævner kortere måleafstande på 100 m og med en forskydning på 50 m.
29. Jakobsen 2007.
30. Visser og Koesrindartono 2000 og Banke 2001 (b).
31. Hildebrandt og Rasmussen 2002.
32. Hildebrandt og Rasmussen 2002.
33. Oplysninger fra hjemmesiden hos Greenwood.