

*Gusa*

DANMARKS NATURVIDENSKABELIGE SAMFUND

---

A. NR. 16

UDGIVET VED

UDVALGET FOR INGENIØRVIDENSKABELIG FORSKNING

POLYTEKNISK  
LÆREANSTALTS LABORATORIUM  
FOR BYGNINGSSTATIK

MEDDELELSE NR. 1

HISTORIE, INDRETNING OG FØRSTE VIRKSOMHED

AF

A. OSTENFELD

I KOMMISSION HOS G. E. C. GADS FORLAG  
KØBENHAVN  
1928

*PRIS 1 Kr. 50 Øre*

DANMARKS INGENIØRAKADEMI  
BYGNINGSAFDELINGEN  
REN OG ANVENDT MEKANIK

Erwin Paulsen

POLYTEKNISK LÆREANSTALTS  
LABORATORIUM FOR BYGNINGSSTATIK

MEDDELELSE NR. 1

HISTORIE, INDRETNING OG FØRSTE  
VIRKSOMHED

AF

A. OSTENFELD

DANMARKS NATURVIDENSKABELIGE SAMFUND

---

A. NR. 16

UDGIVET VED

UDVALGET FOR INGENIØRVIDENSKABELIG FORSKNING

POLYTEKNISK  
LÆREANSTALTS LABORATORIUM  
FOR BYGNINGSSTATIK

MEDDELELSE NR. 1

HISTORIE, INDRETNING OG FØRSTE VIRKSOMHED

AF

A. OSTENFELD

KØBENHAVN

1928

## **POLYTEKNISK LÆREANSTALTS LABORATORIUM FOR BYGNINGSSTATIK.**

Nu da dette Laboratorium omsider er, i alt Fald omtrent, færdig installeret og indrettet, — i en til Sølvgades Kaserne tidligere hørende Staldbygning, Østervoldgade Nr. 6 H, — kan maaske en kort Beretning om dets Historie, Indretning og første Virksomhed paakalde Interesse.

### **Laboratoriets Tilblivelseshistorie.**

Tanken om et saadant Laboratorium tillige med en nærmere Begrundelse af dets Nødvendighed blev første Gang fremsat i et Foredrag, jeg holdt ved Eksamensafslutningen paa Polyteknisk Lærestalt i Januar 1912, gengivet i »Ingeniøren« 1912, Nr. 14. I de nærmest følgende Aar arbejdede jeg videre med Tanken, samlede Oplysninger om Forholdene andre Steder o. s. v., men først i 1916 syntes Udsigterne for dens Gennemførelse saa lovende, at der kunde være Mening i at gøre et Forsøg, og d. 24/5 1916 indsendtes da til Polyteknisk Lærestalt et principielt Forslag om Oprettelse af Laboratoriet. Dette tiltraadtes af Lærestaltens Direktør d. 26/5 1916 og efterfulgtes d. 13/6 1916 af et detaillert Forslag om at indrette Laboratoriet i de Lokaler i Malmøgade, som Statsprøveanstalten den Gang benyttede, men som kunde forudses snart at ville blive ledige. Forslaget, der ledsagedes af Overslag til Anlægs- og Driftsbudget samt af Oplysninger om Forholdene ved en Række fremmede tekniske Højskoler baade i Europa og Amerika, optoges paa Finanslovsforslaget og bevilgedes paa dette i April 1917, med 46 000 Kr. til Indretning af Laboratoriet og 6900 Kr. til den aarlige Drift,

heri indbefattet Begyndelseslønning til en Laboratoriemester samt Husleje i de omtalte Lokaler i Malmøgade, der ventedes ledige i Sommeren 1917.

Allerede i 1916, da det saa ud til, at Sagen vilde gaa igennem, var man begyndt at forhandle nærmere om Levering af Prøvemaskinerne, og i Marts 1917, altsaa endnu inden Bevilningen formelt var i Orden, bestiltes med Ministeriets Billigelse 3 Prøvemaskiner hos Tinius Olsen i Philadelphia. Undervandskrigen og Forviklingerne med Amerika var begyndt at trække op, saa man maatte skynde sig, hvis de lovede Priser skulde kunne holdes. Det var i Virkeligheden i yderste Øjeblik; Telegrammet med Bestillingen naaede nok derover i rette Tid, men kort efter indtraadte Amerika i Krigen, Tinius Olsens Fabrik maatte som saa mange andre indstille Arbejdet paa alle private Ordre og kun udføre Regeringsarbejde, og da (senere) Fremstillingen af de bestilte Maskiner kunde genoptages, var Prisniveauet et helt andet. Tinius Olsen overholdt imidlertid de tilbudte Priser ikke blot paa Maskinerne selv, men ogsaa paa forskelligt, senere bestilt Tilbehør, hvor han neppe en Gang kunde siges at være moralsk bundet, og Polyteknisk Lærestalt har overhovedet kun Grund til at være glad for Samarbejdet med denne fremragende Repræsentant for Skandinav-Amerikanere (Tinius Olsen er Nordmand).

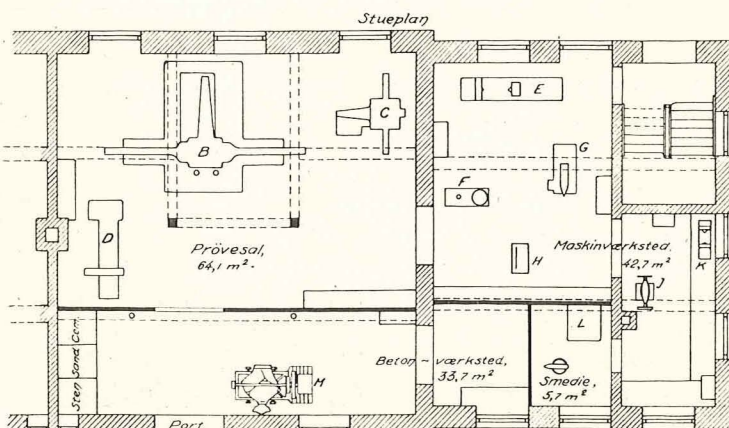
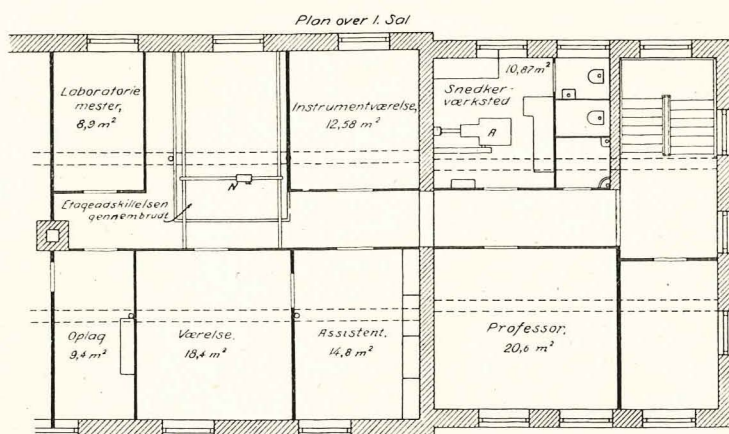
Imidlertid trak det altsaa ud med Leveringen af Maskinerne, og da Lærestalten ogsaa søgte Lokaler til Indretning af et teknisk-kemisk Laboratorium, maatte Laboratoriet for Bygningsstatik (i Foraaret 1918) give Afkald paa Lejligheden i Malmøgade, mod Løfte om at der søgtes skaffet Plads andet Steds, saa snart Laboratoriet virkelig kunde indrettes; en Bemærkning herom optoges paa Lærestaltens Budgetskrivelse af <sup>15</sup>/<sub>6</sub> 1918. — Endvidere var der Vanskeligheder med at faa Udførselstilladelse for Prøvemaskinerne og faa dem afsendt fra Amerika, men ved Henvendelser gennem Gesandtskabet i Washington og ved velvillige Anstrengelser fra »Det almindelige Handelskompagni's Side lykkedes det omsider at overvinde disse. Den sidste af Maskinerne stod dog først færdig til Aflevering i Juni 1919 og ankom hertil i August 1919. Til dette Tidspunkt havde det endnu ikke været muligt at finde et Lokale for Laboratoriet, og Maskinerne maatte derfor foreløbig opmagasineres, de to

mindre paa Lærestaltens Maskinlaboratorium, den 3die og største paa Orlogsværftet. Denne sidste Maskine havde maattet henligge nogle Dage paa den aabne Kaj i Frihavnen, og efter Transporten ud til Orlogsværftet blev den derfor pakket ud af Kasserne og hvert Stykke afgnedet, olieret og atter pakket ned; og her maatte den saa ligge hele 7 Aar, paa en gammel Bedding, ganske vist under Tag, men ellers aabenbart ikke under de aller mest betryggende Forhold, hvad der viste sig ved et paa sine Steder temmelig kraftigt Rustangreb, da den omsider skulde stilles op.

I det Aar, der var gaaet efter Opgivelsen af Malmøgade, havde Lokalespørgsmaalet ikke hvilet. Med Forbigaaelse af en Del Enkeltheder skal det blot nævnes, at man undersøgte følgende Muligheder: en Barak i Botanisk Have ved Siden af de her liggende Tegneste-Barakker (strandede paa Havens Modstand), lejede Lokaler i Teknologisk Instituts Nybygning (de viste sig dog uanvendelige for Formaalet), en Barak i Kommunehospitalets Have, Hjørnet af Bartholinsgade og Nørre-Søgade, hvor i sin Tid Finsen-Institutet begyndte, en Barak paa den gamle Ladegaard eller paa det gamle Banegaards-Terræn, og flere, men alt forgæves. Endelig lykkedes det at finde en Plads, hvor der syntes at være Mulighed for at gennemføre Sagen, nemlig ved Frederiksberg Stationsvej, lige over for Stationen. Kommunen var villig til at udleje Grunden paa (vistnok) 5 Aar, der blev udarbejdet Tegning og Overslag til en Barak (i Novbr. 1918), og Forslaget om at lægge Laboratoriet herud blev med Lærestaltens anbefaling indsendt til Ministeriet i Dec. 1918. Her mødte det strax Modstand, navnlig motiveret ved den store Afstand fra Lærestalten, og disse Betænkeligheder var det ikke muligt at overvinde, ikke en Gang ved Henviisning til, at Laboratoriet var bevilget alene til videnskabelige Undersøgelser, uden Tanke om obligatoriske Øvelser for de studerende, saa Afstanden for dem ingen Rolle kunde spille. Planen maatte derfor opgives.

Endnu et Forsøg blev gjort, inden Prøvemaskinerne kom hjem. Det gik ud paa at bygge en Barak paa Rosenborg Exerцерplads for Bygningsstatik- og Materialprøve-Laboratorierne. Pladsen var i og for sig ikke god, mørk og for tæt ved den befærdede Gothersgade, men Planen betegner for saa vidt et Vendepunkt, som der her efterhaanden blev Tale om at skaffe Plads





- |                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| A, Boandsav               | H, Sav                |
| B, 100 t Trækprøvemaskine | J, Støbemaskine       |
| C, 10 t "                 | K, Lille Drejebænk    |
| D, Torsionsmaskine        | L, Esse               |
| E, Drejebænk              | M, Betonblandemaskine |
| F, Boremaskine            | N, 2 t Løbekran       |
| G, Shapingmaskine         |                       |

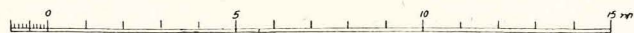


Fig. 1. Plan af Laboratoriet.

anstaltens 50<sup>t</sup> Maskine. Kraften frembringes ved rent mekaniske Udvexlinger, i sidste Instans ved fire svære lodrette Skruer, der forskydes i deres Længderetning ved Hjælp af Møttrikker, der er udformede som Tandhjul og derved drejes, men ikke kan forskydes. Kraften maales ved direkte Vejning med en Bismær, der gennem tre Vægtstangsudvexlinger vejer hele den Belastning, der virker paa Maskinens nedre Bord. Vægtloddets Bevægelse ud og ind kan udføres ved et Haandhjul eller automatisk, ved Hjælp af et elektrisk Strømløb, der fødes fra et specielt Batteri; dette sidste er dog nu erstattet ved Strømaftagning fra Ledningsnettet gennem en Omformer. Der haves tre Vægtlodder af forskellig Størrelse; for det 1ste betyder hele den gennemløbne Vej 5<sup>t</sup>, for det 2det 50<sup>t</sup> og for det 3die 100<sup>t</sup>. — Endvidere er Maskinen udstyret med et Diagramapparat for Træk- og Trykforsøgene. — Hastigheden kan varieres indenfor ret vide Grænser, fra 0,85 til ca. 170 mm pr. Minut, dels ved at variere Motorens Hastighed, dels ved at ændre paa Udvexlingerne gennem to Koblinger. I Fig. 3 og Fig. 6 nedenfor ses et Par Fotografier af Maskinen.

Paa et Par væsentlige Punkter afviger Maskinen fra Tinius Olsens normale Konstruktion, idet den kan behandle en Søjle af ca. 4,6 m Højde (et Træk-Prøvestykke af samme Længde, hvad dog har noget mindre Interesse) og en Bjælke af 5 m Længde. Det havde været ønskeligt, om den maximale Søjlehøjde havde været endnu noget større, og i de nuværende Lokaler havde dette ogsaa været muligt; men Maskinen blev i sin Tid bestilt, saa den passede til Forholdene i Malmøgade. For hurtigt at kunne køre det bevægelige Bord op og ned og derved indstille efter de forskellige Længder af Prøvestykket er der tilføjet en speciel lodret Axel, som gennem forskellige Udvexlinger kan løfte og sænke Bordet uafhængigt af de fire Skruer, gennem hvilke Kraften overføres til Bordet under Forsøgene.

Maskinen lider af et Par Smaa-Ubekvemmeligheder, som skriver sig fra den Ændring, der maatte foretages med Fabrikken normale 100<sup>t</sup> Type for at gøre den anvendelig for den ønskede store Søjlehøjde. Maskinens fire lodrette Søjler er for Afstivningens Skyld med visse Mellemlum forbundne ved vandrette Tværstykker, der kan boltes paa og tages af; men de kan ikke passeres af det øvre bevægelige Bord, saa hver Gang en saadan

Passage bliver nødvendig, maa Tværstykkerne fjernes, og glemmer man dette, maa der ske en Ulykke. Denne Ulempe søges nu afhjulpen ved Tilføjelse af et Signalapparat, der advarer i Tide, inden en Paakørsel kan finde Sted (planlagt og udført af Laboratoriemester *Nielsen*). — Endnu en Tilføjelse har det været nødvendigt at foretage, nemlig et Mellemløje for den omtalte lodrette Axel, der tjener til hurtig Flytning af Maskinens bevægelige Bord. Denne Axel var altfor lang og spinkel til at kunne nøjes med Understøtninger helt foroven og forneden, hvilket naturligvis navnlig viste sig, naar man lod den løbe hurtigt. Det tilføjede Løje er anbragt paa et af de aftagelige Tværstykker og fjernes sammen med dette ved Bordets Passage. — En anden Ulempe er den forholdsvis noget knebne Plads mellem Maskinens Søjler, men herved er der intet at gøre.

Maskinen er opstillet i en Forsænkning i Gulvet, saa dens »Bord« ligger i en bekvem Højde (0,55 m) over Gulvet. Dens Søjler stikker, som nævnt, op gennem en Gennembrydning af Etageadskillelsen mellem Stue og 1ste Sal og naar omtrent op til Loftet over 1ste Sal, dog saaledes at der her er Plads til en 2<sup>t</sup> Kørekran, der behersker et Areal saa stort som Gennembrydningen.

Den 10<sup>t</sup> Prøvemaskine er principielt af samme Konstruktion som den 100<sup>t</sup> Maskine. Kraften frembringes ogsaa her ved mekanisk Træk i fire lodrette Skruer og maales ligeledes ved en Bismær; kun haves her ikke den automatiske Flytning af Vægtloddet, og dette forekommer kun i to Størrelser, svarende til 1<sup>t</sup> og 10<sup>t</sup> for hele Skalaen. Største Søjlelængde, der kan prøves, er ca. 1,8 m, største Bjælkylængde 2,0 m. Maskinens Hastighed kunde oprindeligt, ved Hjælp af de to Koblinger, varieres mellem ca. 2,86 mm og 131,5 mm pr. Minut; der er imidlertid nu, efter Opstillingen, tilføjet en extra Udvexling paa omtrent 1:5, der kan skydes ud og ind, saa Hastigheden herved kan sættes ned til ca. 0,57 mm pr. Minut. Maskinen lider af den samme Mangel som den store, at der er lidt kneben Plads udenom Prøvestykket, men er ellers overmaade bekvem til Forsøg med mindre Dimensioner, Bøjningsforsøg o. lign.

Vridnings-Maskinen kan præstere et vridende Moment paa indtil 600 kgm. Den bestaar af et kraftigt Understel af 2,2 m Længde; dette bærer to Indspændingshoveder (for det

vandret liggende Prøvestykke), af hvilke det ene drejes af Motoren gennem en Række Udvexlinger, medens det andets Drejning hindres af en Vægtstang (Bismær) med et flytteligt Vægtlod, saaledes at man her maaler Vridningsmomentets Størrelse; Vægtloddet kan kun flyttes ved et Haandhjul. Det sidst omtalte Indspændingshoved kan forskydes langs Vangerne ved et Drev og Tandstang og saaledes indstilles efter Prøvestykkets Længde; største fri Længde mellem Indspændingshovederne er 1,55 m. Maskinen har kun to Hastigheder, eller i Virkeligheden kun én, der kan benyttes ved Forsøgene, og den giver en Vridning af Prøvestykket paa omtrent 1 Grad pr. Minut (nøjagtigt: 57'); den anden Hastighed er betydelig større og bruges kun ved Tilbagegangen. Højest sandsynligt bliver det her, ligesom ved den lille Maskine ovenfor, nødvendigt at tilføje en extra Udvexling. — Indspændingshovederne er nærmest kun beregnede for Prøvestykker af Rundjærn eller Firkantjærn; ved andre Profiler, større Dimensioner eller særlige Understøtningsmaader maa der fremstilles særlige Indspændingsindretninger.

Tilbehør til Maskinerne. Sammen med Maskinerne leveredes af Tinius Olsen en Del Apparater til Anvendelse ved de almindeligste Forsøg. Til Vridningsmaskinen hører saaledes et Apparat, der spændes paa Prøvestykket til Maaling af Vridningsvinklen; der kan aflæses 0,1 Grad, men ligesom Indspændingshovederne egner Apparatet sig kun for Prøvestykker af Rundjærn og lignende. Med Universalprøvemaskinerne fulgte de sædvanlige Tinius-Olsen'ske Indspændingsbakker for Trækprøvestykker, forskellige cylindriske Trykplader for Trykprøver, Understøtningsklodser for Bjælker til Bøjning samt en Nedbøjningsmaaler med Forstørrelse 10:1 og Noniusaflæsning.

Af andet Tilbehør er senere fremstillet: Belastningsanordning til Frembringelse af to Enkeltkræfter ved Bøjningsforsøg, Stativ for Nedbøjningsmaaleren, saa Bjælkens Sammentrykning over Understøtningerne elimineres, forskellige Stativer til Opspænding af Udbøjningsmaalere for Søjler, til Maaling af Søjle-Understøtningers Drejning, to Kugleskaale til Centrering af Trækprøvestykker, ogsaa anvendelige ved svagere Trykprøver m. m., alt paa Laboratoriets eget Værksted. Tidligere anskaffet fra et Maskinværksted her i Byen var to Sæt Knivseg-Apparater til henholdsvis 10<sup>t</sup> og 100<sup>t</sup> Maximumstryk, men ogsaa med dem har



Laboratoriets Værksted haft et stort Arbejde, med Tilpasningen til Maskinerne og Forbindelserne mellem de enkelte Dele af Apparaterne o. s. v. Fig. 2 viser et Fotografi af 100<sup>t</sup> Apparaterne; de bestaar af tre Hoveddele: en Under- og en Overdel, af hvilke den ene er indrettet til at ophænges i eller støttes paa Maskinen, den anden til derpaa at fastspænde Søjlen, der skal

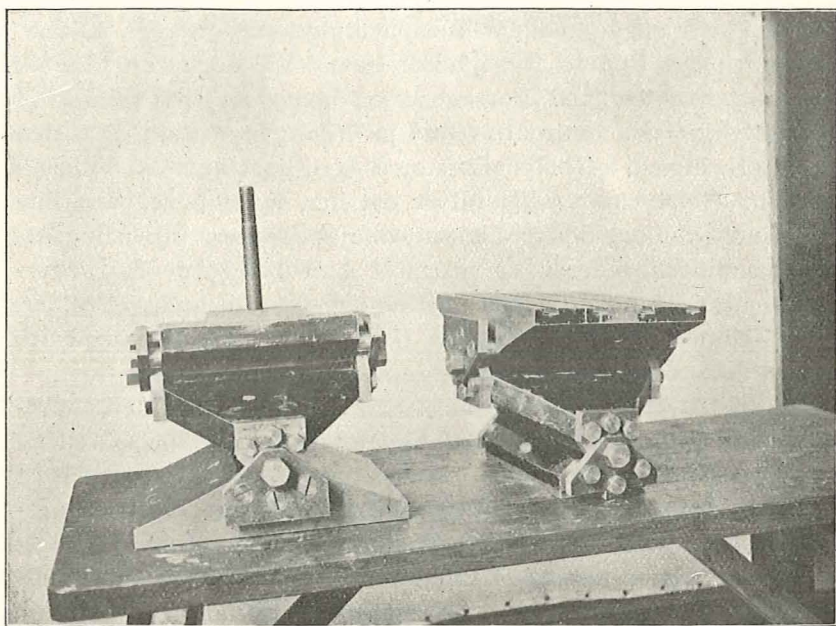


Fig. 2. Fotografi af Knivseg-Apparater (100<sup>t</sup>).

prøves, og et Mellemstykke, hvori der paa Over- og Undersiden er indlagt to paa hinanden vinkelrette Knivsegge, der støtter mod Pander i Over- og Underdelen. De tre Hoveddele er forbundne indbyrdes paa en saadan Maade, at Drejningen om Knivseggene ikke hindres, men saaledes at de tre Dele kan ophænges i eller støttes paa Maskinen som ét Stykke. — Som Understøtninger for centralt paavirkede Søjler har Apparaterne den Fejl, at de to paa hinanden vinkelrette Knivsegge ikke ligger i samme Plan; ved excentrisk Paavirkning spiller dette en mindre Rolle. — Fra Amsler (Schaffhausen) er købt en Kugleskaal til Trykprøver (op til 100<sup>t</sup>).

Værkstederne. Maskinværkstedets Udstyrelse fremgaar af Planen, Fig. 1. Alle Maskiner og tilhørende Værktøj er leveret af V. Lowener.

Den større Drejebænk er en Præcisions-Hurtigdrejebænk »Ohio« Nr. 5, med 230 mm Pinolhøjde, 1525 mm Pinolafstand, 35 mm Spindeludboring, med Forkrypning, Prismevinge og Ledeskrue;

Boremaskinen en Hurtigboremaskine »Jutlandia«, Model M. S. II, der borer Huller op til 32 mm Diameter;

Shapingmaskinen en 22" Shapingmaskine »Dania« Nr. 3 med største Høvlélængde 560 mm;

Koldsaven kan overskære 6" rundt eller firkantet Materiale; de fire nævnte Maskiner trækkes fra samme 5 HK. Motor.

Slibemaskinen har sin egen 1 HK. Motor og er indrettet for to Slibeskiver af indtil 250 mm Diameter.

Den mindre Drejebænk, for finere Arbejde, har ligeledes sin egen Motor og er en Boley-Præcisionsdrejebænk med Ledeskrue, 90 mm Pinolhøjde, 450 mm Pinolafstand, 15 mm Spindeludboring.

Pladesaxen er til Haandkraft, har 220 mm Knivlængde og klipper Plade indtil 6 mm, Rundjærn indtil 18 mm.

Smedeessen er en amerikansk Buffalo-Esse med direkte elektrisk dreven Blæser ( $\frac{1}{3}$  HK) og Exhaustor (1 HK).

I Betonværkstedet findes Kasser til Cement, Sand og Sten, en »Jutlandia«-Blandemaskine (fra »Pedershaab« Cementindustri A. S., Brønderslev) Nr. 3 til ca. 50 Liter, med direkte koblet 1 HK-Motor, samt forskelligt Værktøj og Forme.

I Snedkerværkstedet, som desværre ikke har kunnet finde Plads i Stue-Etagen, findes en 700 mm Baandsav fra J. B. Bruun & Søn (Nykøbing, F.) med 4 HK-Motor, samt Høvlébænk og forskelligt Værktøj.

Instrumentværelset indeholder en Del Finmaalings-Instrumenter, dels til Brug i Laboratoriet, dels ogsaa til Maalinger ude i Marken, paa færdige Konstruktioner. Foruden nogle almindelige Skydelærer, Skruemikrometre, Libeller, Thermometre og lign. nævnes:

et Martens-Spejlapparat med 10 og 15 cm Maalelængde,

fremstillet af *Rich. Heiser*, Mekaniker ved Materialprøveanstalten i Berlin-Lichterfelde; fra *Amsler* (Schaffhausen) er fornylig leveret supplerende Indretninger for 5, 20 og 30 cm Maalelængde tillige med en Fastspændingsramme for Prøvestykker af større Dimensioner og endvidere dette Firmas adskilligt mere praktiske Stativ;

4 Stkr. ældre Manet-Rabut-Spændingsmaalere (eller Forlængelsesmaalere), med direkte Aflæsning af  $\frac{1}{100}$  mm, fra *E. Bourdon*, Paris;

1 Stk. Manet-Rabut-Mantel-Spændingsmaaler, ganske som foregaaende, men med Mantels Forbedring af Konstruktionen, fra *Hans Mettler* (tidl. *Th. Usteri-Reinacher*) Zürich, og

1 Stk. Manet-Rabut-Spændingsmaaler af *Stoppani's* forbedrede Konstruktion, fra *A. Stoppani*, Bern, ligeledes med direkte Aflæsning  $\frac{1}{100}$  mm;

2 Klinometre fra *Hans Mettler*, Zürich, til Maaling af Vinkelændringer; mindste direkte Aflæsning er 4,15 Sekunder;

2 Klinometre fra *A. Stoppani*, Bern, af en lidt forbedret Konstruktion, hvor mindste direkte Aflæsning betyder 1,15 Sekunder.

6 Stkr. *Okhuizen*-Spændingsmaalere, til Maalelængder 2 cm, 10 og 30 cm, Forstørrelse 500 : 1 eller 1000 : 1, leverede af Ingeniør *Okhuizen*, Haag;

4 Stkr. *Huggenberger*-Tensometre (Model B) af ganske lignende Konstruktion som *Okhuizen*-Apparaterne, med Maalelængder 2 cm, 10, 20 og 50 cm, Forstørrelse 1000 : 1, leverede af *Huggenberger*, Zürich;

3 Stkr. *Berry*-Extensometre med Maalelængde henholdsvis 5, 20 og 50 cm, Forstørrelse 500 : 1, til Brug enten fastspændte paa den Stang, hvis Forlængelse skal maales, eller flyttelige, idet Instrumentet med sine koniske Spidser anbringes i Huller (ca. 1 mm i Diameter og lidt forsænkede), der i Forvejen er borede i Stangen; man kan saaledes med ét Apparat udføre Maalinger for samme Belastningsstilling paa mange forskellige Punkter af Konstruktionen; leverede fra Prof. *Berry*, University of Pennsylvania, Philadelphia.

6 Stkr. *Griot*-Nedbøjningsmaalere, hvortil den Bevægelse, der skal maales, som bekendt overføres gennem en belastet Maaletraad;

1 Stk. *Griot*-Nedbøjningstegner, som optegner Nedbøjningerne paa et plant Stykke Karton, der under Maalingen automatisk faar en vandret Bevægelse (dennes Størrelse er dog ikke proportional med Tiden eller Belastningens Bevægelse);

1 Stk. *Mettler*-Nedbøjningsmaaler, } hvor Bevægelsen overføres  
6 Stkr. *Zivy*-Nedbøjningsmaalere, } ved direkte Berøring eller  
ved Maaletraad;

alle de hidtil nævnte Nedbøjningsmaalere med direkte Aflæsning  $\frac{1}{20}$  mm;

4 Stkr. *Stoppani*-»Maaleure«, med direkte Aflæsning  $\frac{1}{100}$  mm;

1 Stk. *Stoppani*-Nedbøjningstegner (Oscillograf), med tilhørende Kronograf.

Endelig nævnes, at Laboratoriet besidder Prof. *Beggs's* (Princeton University, N. J.) Apparat-Samling (mindre Udgave) til Modelforsøg, navnlig til Undersøgelse af statisk ubestemte Konstruktioner, Modellerne fremstillede af Karton eller Celluloid-Plade; endvidere en *Brunsviga*-Regnemaskine, et *Coradi*-Planimeter og en *Coradi*-Integraf, ligesom der er lagt Grunden til et Special-Bibliothek.

Laboratoriets Personale omfatter en fast Assistent (Ing. cand. polyt. A. J. Moe), en fast ansat Laboratoriemester (A. M. A. J. Nielsen), der begge har medvirket lige siden Laboratoriets Oprettelse, samt en midlertidig Assistent (stud. polyt. Helge Christensen, fra Juni 1927); næsten hele Tiden har Arbejdet desuden krævet en Extramand (Maskinarbejder).

### Laboratoriets første Virksomhed.

1. Virksomhed indadtil. Efter at Prøvemaskinerne var færdig opstillede, maatte det første Arbejde gaa ud paa at faa dem justerede og opnaa Øvelse i at bruge dem; og dette sidste kunde praktisk kombineres med en Justering af forskellige af de ovenfor opregnede Instrumenter, navnlig Apparaterne til Spændingsmaaling.

Det gjaldt først om at faa justeret den 100<sup>t</sup> Prøvemaskine, og hermed var Statsprøveanstalten Laboratoriet behjælpelig, idet den d. 17/12 26 velvilligst udførte en Spejlmaaling paa sin

Kontrolstang, anbragt som Trækprøvestykke i Maskinen. Maa-lingen førtes op til 41<sup>t</sup> Træk, og ved Sammenligning af de paa Maskinen aflæste og de af Kontrolstangens Forlængelser beregnede Kraftstørrelser fandtes en procentvis Fejl i Maskinens Angivelser paa ca. 1,5 ‰. Denne Fejl kunde naturligvis korrigeres ved en lille Ændring paa Vægtlodderne, men forinden noget

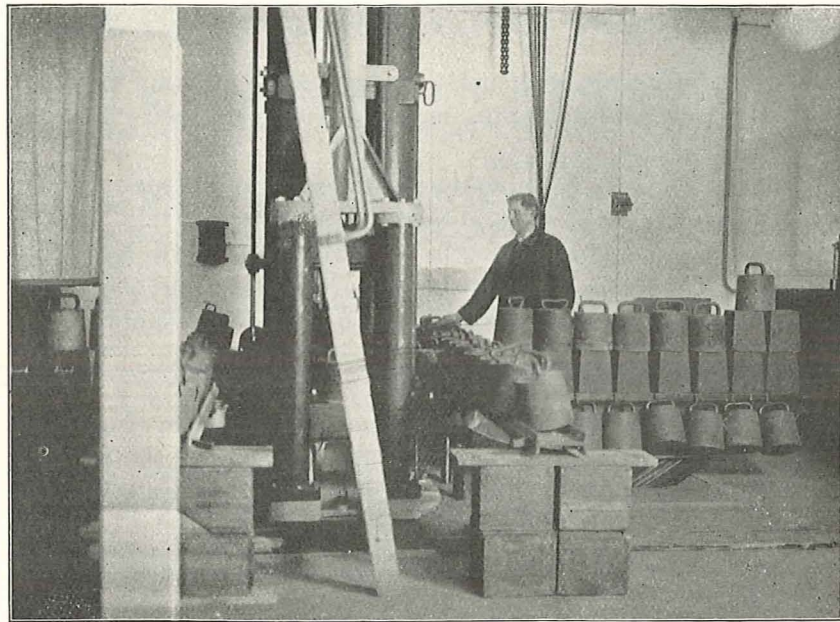


Fig. 3. Fotografi af 10<sup>t</sup> Maskine, med Vægtprøvelodder.

saadant foretoges, bestemte man sig dog til at udføre en direkte Kontrolvejning, der foregik paa følgende Maade (d. 25/1—26/1 1927). Maskinens Bord og Bøjningsarme belastedes med 50 kg Vægtprøvelodder, laante fra Justervæsenet. 2000 kg af disse Lodder var de af Justervæsenet nu benyttede, justerede med en Fejlgrænse af  $\pm 5$  gr; Resten (3000 kg) var ældre Vægtprøvelodder, men disse benyttedes kun paa den Maade, at der først belastedes alene med de korrekte Lodder, hvorefter disse (i Partier paa 1700 kg, 1000 kg og 300 kg) erstattedes med ældre Lodder og den fremkomne Differens udlignedes ved Hjælp af Laboratoriets egne Decimalvægt-Lodder. Vægtlodderne dels stillede paa Bord

og Arme, dels hængtes op to og to til Armene i Rundjærnsbøjler, dels endelig stillede paa to Stkr. I-Bjælker, der lagdes paa Fladen tværs over Armene, én paa hver Side lige udenfor Maskinens Søjler (se Fig. 3). Der aflæstes for hver 1000 kg baade under Belastningen op til 5000 kg og Aflastningen, idet der under Belastningen anvendtes det mindste Lod (5<sup>t</sup>), under Aflastningen det mellemste (50<sup>t</sup>). Eksempelvis anføres de under Belastningen fundne Resultater i de to første Kolonner i hosstaaende Tabel. —

Belastning kg	Aflæsning paa Maskinen kg	Korrigeret Aflæsning y (kg)
0	0	1,2
1000	994,5	993,5
2000	1985	1985,8
3000	2977,5	2978,1
4000	3971	3970,4
5000	4963,5	4962,7

For at adskille Begyndelses- og procentvis Fejl sattes Aflæsningen  $y = a + bx$ , hvor  $x$  er den virkelig anbragte Belastning, og ved Bestemmelse af Konstanterne  $a$  og  $b$  efter mindste Kvadraters Methode fandtes:

$$a = 1,2, \quad b = 0,9923;$$

de korrigerede Aflæsninger  $y$  er opførte i Tabellens sidste Kolonne. Herefter var der altsaa en Begyndelsesfejl paa 1,2 kg, hvad der er uden Betydning, og en procentvis Fejl paa:

$$1000 - 992,3 = 7,7 \text{ ‰} = \text{ca. } \frac{3}{4} \text{ ‰}.$$

Under Nedgangen fandtes paa samme Maade med det mellemste Lod en procentvis Fejl paa ca.  $\frac{2}{3}$  ‰ (i samme Retning); disse Fejl er senere rettede ved at fjerne 11,4 gr, 114 gr og 228 gr Bly fra de tre Vægtlodder, hvorefter Maskinen regnes at vise korrekt.

Den 10<sup>t</sup> Prøvemaskine justeredes ligeledes ved direkte Belastning med de samme Vægtlodder. Der fandtes saa forsvindende Afvigelse, at man praktisk talt kunde regne Fejlen lig Nul.

Justeringen af Vridningsmaskinen foregik en Del senere (d. 11-12/5 27). Det vridende Moment frembragtes ved at spænde en af to Vinkeljærn (100·100·10) bestaaende Bjælke fast paa et i Maskinen indspændt Stykke Axel og paa denne, i 1,0 m Afstand fra Axlen, at lade virke op- og nedadrettede Trækkræfter ved Hjælp af Fjedervægte, laante fra Maskinlaboratoriet. Man lod Kræfterne voxe med 25 kg ad Gangen op til 200 kg, hvorved Vridningsmomentet voxede med 50 kgm ad Gangen op til 400 kgm; Fjedervægtene justeredes umiddelbart i Forvejen

ved direkte Belastning med Vægtlodder og for de samme Kraft-Intervaller. Aflæsningerne paa Maskinen paavirkedes aabenbart en Del af Friktionen, idet man kunde finde 2—300 kgcm Forskel, eftersom man nærmede sig til Ligevægtstillingen ovenfra eller nedenfra; der blev derfor hver Gang taget Middeltal mellem Aflæsningerne for disse to Bevægelsesretninger. Resultatet af Maalingerne var, at man kunde regne med en Begyndelsesfejl Nul og en procentvis Fejl paa ca. 0,4 %; denne er senere rettet paa Vægtloddet.

Verifikationen af de forskellige Spændings- og Nedbøjningsmaalere optog det meste af Tiden Febr.—Maj 1927, hvorved maa erindres, at de forskellige Maalinger stadig krævede nye Apparater fremstillede i Værkstedet. Til de fleste af disse Verifikationer benyttedes et Træk-Prøvestykke af Bofors-Martin-staal, nøjagtig afdrejet til 30 mm Diameter. Herpaa foretoges først Spejlmaaling til Bestemmelse af den nøjagtige Forlængelse af den Strækning, paa hvilken Spændingsmaalerne senere anbragtes, og ved Sammenligning af Spændingsmaalerens Angivelser hermed kunde man saa verificere disse eller bestemme en Korrektionskoefficient for dem eller kontrollere Rigtigheden af den Korrektionskoefficient, der var opgivet af Fabrikanten.

Alle disse Verifikationsmaalinger vilde have været simplest og paalideligst, hvis man havde kunnet maale Forlængelsen af Prøvestykket mellem nøjagtig de samme to Punkter paa én Gang med Spejlapparatet og det Instrument, man skulde verificere. Det var imidlertid umuligt, baade for Pladsens Skyld og af Hensyn til de ikke altid ens Maalelængder for Spejlapparat og Instrument, at faa disse to anbragt paa én Gang paa Prøvestykket, og tilmed mellem de samme Punkter, paa samme Frembringer. Der var derfor ikke andet at gøre end først at foretage en Spejlmaaling med en Maalelængde lig med eller større end den, der skulde bruges for det omhandlede Instrument, og selvfølgelig langs to diametralt modsatte Frembringere, og dernæst at anbringe Instrumentet indenfor den samme Maalelængde, først langs én Frembringer og bagefter langs den diametralt modsatte, og gentage Belastningen hermed. Rent eksempelvis anføres de for Okhuizen-Apparatet Nr. 6 med 2 cm Maalelængde og Forstørrelse 500:1 udførte Maalinger og Beregninger i følgende Tabel:

1ste Maaling, langs højre Frembringer					2den Maaling, langs venstre Frembringer				
Belastning P kg	Aflæsn. $O_6$ $\frac{1}{500}$ mm	$\Delta P$	$\Delta O_6$	$\Delta O_6$ pr. 2000 kg	Belastning P kg	Aflæsn. $O_6$ $\frac{1}{500}$ mm	$\Delta P$	$\Delta O_6$	$\Delta O_6$ pr. 2000 kg
4050	22,6	1975	1,45	1,47	4065	14,1	2045	1,45	1,42
6025	24,05	1970	1,55	1,57	6110	15,55	1900	1,45	1,52
7995	25,6	2015	1,6	1,59	8010	17,0	2070	1,55	1,50
10010	27,2	1980	1,6	1,62	10080	18,55	1945	1,55	1,59
11990	28,8	7915	6,15	1,55	12025	20,1	7970	5,9	1,48
4075	22,65	960	0,75	1,56	4055	14,2	955	0,75	1,58
5035	23,4	1995	1,55	1,55	5010	14,95	1990	1,35	1,36
7030	24,95	1955	1,5	1,53	7000	16,3	2030	1,6	1,57
8985	26,45	2025	1,55	1,53	9030	17,9	2040	1,5	1,47
11010	28,0	1000	0,8	1,60	11070	19,4	955	0,7	1,47
12010	28,8	7980	6,1	1,53	12025	20,1	7975	5,8	1,46
4030	22,7				4050	14,3			
				Middeltal 1,555					Middeltal 1,484

Middeltallet for Maaling langs højre og venstre Frembringer bliver saaledes 1,52, medens Spejlmaalingen pr. 2000 kg og for 2 cm Maalelængde har givet  $\frac{1,386}{500}$  mm. Korrektionskoefficienten bliver derfor:  $\frac{1,386}{1,52} = 0,91$ , medens den af Okhuizen er opgivet til 0,899. Det bemærkes, at Tallene  $O_6$  kun direkte aflæses som hele; 1ste Decimal er skønnet ved Aflæsningen, 2den Decimal er kommen med ved Reduktionen til samme Belastningsinterval.

2. Virksomhed udadtil. Udover de videnskabelige Undersøgelser indenfor Murene, som maa betragtes som Laboratoriets Hovedopgave, er det ogsaa Hensigten, at Laboratoriet skal kunne yde Assistance udadtil, naar der er Tale om saadanne bygningsstatistiske Spørgsmaal, som ikke falder ind under andre Institutioners Virksomhedsomraade, saaledes f. Ex. Forsøg med specielle Konstruktioner eller Konstruktionsdele, Spændingsmaalinger paa færdige Konstruktioner og lign.

Den første Opfordring til at yde Assistance ved en saadan Opgave fremkom allerede i Dec. 1926, altsaa inden man endnu var naaet saa vidt med Indretningen og de ovenfor omtalte forberedende Arbejder, at Laboratoriet egentlig kunde siges at

være arbejdsdygtigt. Det drejede sig om en Anmodning fra Statstelegrafvæsenet, gennem de projekterende Ingeniører for Radiotaarnene ved Kallundborg, d'Hrr. *Nøkkentved &*

*Friis-Jespersen*, om at faa undersøgt de Trykprofiler, som det var paatænkt at anvende for Flangestængerne i Taarnene. Profilet var, som det ses i Fig. 4, sammensat af to svære Vinkeljærn i en saadan indbyrdes Stilling, at de to af Fligene dannede  $60^\circ$  med hinanden, og idet denne Tværnsnitsform næppe er anvendt tidligere, var det af Vigtighed at faa konstateret, om de paatænkte sekundære Forbindelser var tilstrækkelige til at sikre, at de to Vinkeljærn kom til at fungere som én Stang.

Efter Samraad med Laboratoriet leveredes da til Prøve ialt 4 Søjler, de to af Længde 2,364 m, de to andre 3,78 m. Hver Søjle var sammensat af to  $\angle 100 \cdot 100 \cdot 10$  mm, der ved Enderne var forbundne ved en 350 mm lang bøjet Plade med 5 Stkr. Nitter i hvert Vinkeljærn (Forbindelsen her skulde svare til Knudepunktsforbindelsen i Taarnet), og kantet med Vinkeljærnstykker, saa der dannedes en Fod, hvormed Søjlen kunde hvile paa Knivseg-Pladerne i Prøvemaskinen (se ogsaa Fotografiet i Fig. 6). Af de sekundære Forbindelser deltes de korte Søjler i tre Fag à 512, 610 og 512 mm, maalt mellem de yderste Nitter i Forbindelserne, de lange Søjler i fire Fag à 725, 770, 770 og 725 mm. De lange Søjler er vist i Fig. 4, hvor ogsaa ses disse sekundære Forbindelser, dannede af et bøjet Stykke 8 mm Plade paa de to Vinkelflige, der danner  $120^\circ$  med hinanden, med to Nitter i hver Vinkelflig, samt af et bøjet Stykke Vinkeljærn  $65 \cdot 65 \cdot 9$  mm. Alle Nitter var 22 mm.

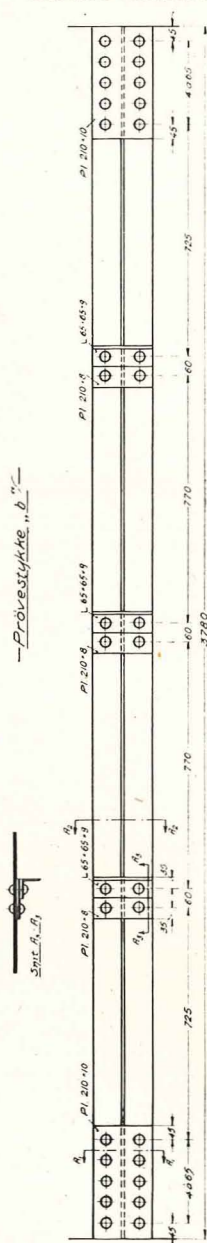


Fig. 4. Radio-Søjler, Detailtegning.

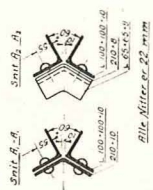


Fig. 5.

Hovedformalet med Forsøgene var som sagt at faa konstateret, om de to Vinkeljærn virkede sammen som én Stang, og rent praktisk kunde dette undersøges ved at bestemme Søjlen Brudbelastning og sammenligne denne med det Tryk, som en usammensat Søjle af samme Materiale og Tværnsnitsdimensioner bør kunne taale. Men foruden denne saa at sige indirekte (om end meget haandgribelige) Methode anvendte man ogsaa en direkte Maaling af Tværnsnittets Formforandring for herigennem at faa fastslaaet, om de to Vinkeljærn fulgtes nøjagtigt ad helt op til Brud.

Søjlerne understøttedes ved Forsøgene paa de ovenfor omtalte Knivsegge, idet de gennem den paanittede Vinkeljærns-Fod fastboltedes til Knivseg-Apparatets »Bord«. Endefluden af de to Søjlevinkeljærn, der stod lidt frem for Foden, var afrettet saa nøjagtigt plan som muligt, og for yderligere at sikre en ensformig Trykfordeling over hele Tværnsnittet lagdes en 2 mm tyk Kobberplade imellem. Centreringen af Søjlen over de to krydsende Knivsegges Skæringspunkt udførtes ved Opstillingen saa nøjagtigt (rent geometrisk) som muligt; den herved opnaaede Tilnærmelse til en ren central Paavirkning kontrolleredes under Forsøget ved Spændingsmaalinger, hvormed nedenfor. — Da de to Knivsegge ikke ligger i samme Plan, fik man noget forskellige »frie Længder« for Søjlen i de to Retninger. For Udbøjning om Axen 2 (med mindst Inertimoment, se Fig. 5) var disse frie Længder 2,57 m og 3,99 m henholdsvis for de korte og de lange Søjler, for Udbøjning om Axen 1 var Længderne 2,82 og 4,24 m. Trods denne Forskel var Slankhedsforholdet ( $l:i$ ) for alle Søjlerne betydeligt større for Axen 2 end for Axen 1, saaledes at Udknækningen maatte ventes, og ogsaa altid indtraf, om Axen 2. Da det ogsaa er denne Udknækningsretning, der er den farligste for de virkelige Stænger i Taarnene, gjaldt det kun om at undersøge, om de sekundære Forbindelser var tilstrækkelige til at sikre den fulde Bæreevne for denne Bøjningsretning; men

dermed at Forsøgene har paavist fuld Sikkerhed i saa Henseende, er ikke sagt noget, om de sekundære Forbindelser og saa er stærke nok til at udvikle den fulde Bæreevne for Bøjningsretningen 1, hvad selvfølgelig stiller større Krav til Forbindelsernes Styrke.

Ved Forsøgene maalttes foruden Trykket i Søjlen:

1. Udbøjningerne ved Søjlemidten af Punkterne  $x$  og  $y$  (Fig. 5) i Retningen 1 og af Punktet  $z$  i Retningen 2, ved tre *Zivy*-Nedbøjningsmaalere;
2. Udbøjningerne i de samme to Retninger af Søjle-Enderne, hvor de stødte til Knivseg-Bordene, ved fire *Griot*-Nedbøjningsmaalere; disse Udbøjninger var altid temmelig forsvindende undtagen kort før Bruddet;
3. Spændingerne i de 4 Punkter  $a, b, c, d$  (Fig. 5) ved Søjlemidten, eller nøjagtigere i fire Punkter i ca. 1 cm Afstand fra Kanten af Vinkelfligene, ved fire *Okhuizen*-Apparater med 10 cm Maalelængde og Forstørrelse 500 : 1, som Kontrol paa Centrerings-
4. Afstandene  $a-b, c-d$  og  $x-y$  maalttes med Skydelære, med Aflæsning  $\frac{1}{10}$  mm; i de Punkter, hvorimellem Afstandene maalttes, var der boret Huller og indsat Messingskruer med afrundede Hoveder, som Skydelærens Kæber skulde tangere.

Før Forsøgene undersøgte Søjlernes Retlinethed ved at lægge en Staallineal til Vinkelfligene. Ved Fremstillingen af Søjlerne var Retningen af Vinkeljærnene aabenbart udført ved en undertiden ret voldsom Overhamring, og nøjagtig Retlinethed var ikke opnaaet; der konstateredes lokale Udbøjninger af Vinkelfligene paa indtil 3 mm, oftest saaledes at den ene Vinkelflig var forholdsvis retlinet, medens samme Vinkeljærns anden Flig var vredet i Forhold hertil. For Søjlen som Hele var Afvigelse dog ikke saa store (og heller ikke saa lovmæssige), at der var Grund til (eller at det var muligt) at tage dem med i Beregning, men baade disse Afvigelser og den omtalte Overhamring, der naturligvis ikke har været uden lokal Indflydelse paa Materialets Stivhed (Flydegrænse), gør det sandsynligt, at de ved Forsøgene her fundne Resultater snarest ligger under, hvad man kan vente af en fejlfrit udført Jærnkonstruktion.

Efter Forsøgene sloges Nitterne ud og adskiltes Søjlerne, saa

man kunde komme til at veje de enkelte Vinkeljærn og derved (i Forbindelse med direkte Maalinger) faa en paalidelig Bestemmelse af Tværnsnitsdimensionerne, som nemlig afveg noget fra de nominelle, 100·100·10 mm. I Oversigtstabellen nedenfor er der regnet med de saaledes bestemte Dimensioner for hver Søjle. — Endelig blev der efter Forsøgene skaaret Træk- og Trykprøvestykker ud af Vinkeljærnene til Bestemmelse af Materialets Flyde- og Brudgrænse.

Angaaende de enkelte Maalinger bemærkes følgende:

1. Udbøjningen af Søjlemidten i Udknækningsretningen (i Retningen 1, Fig. 5) voxede nogenlunde jævnt og meget langsomt lige til kort før Bruddet, hvor *Zivy*-Apparatets Viser gav sig til at »løbe«; den sidst maalte Udbøjning lige før Udknækningen (1 à 3<sup>t</sup> under Brudbelastningen) var for de fire Søjler: 6,0—3,7—9,3—6,5 mm. I den herpaa vinkelrette Retning holdt Udbøjningen sig omtrent konstant for de to korte Søjler og voxede for de to lange langsomt op til Brud. Søjlerne forholdt sig altsaa ganske normalt, naar man tager de ovenfor omtalte Mangler — Afvigelser fra Retlinethed og lokale Forskelle i Stivhed — i Betragtning. Trods disse og de hermed følgende smaa Udbøjninger foregik Bruddet afgjort som en ret pludselig Udknækning.

3. Spændingsmaalingen i Søjlemidterne ved Kanterne af de fire Vinkelflige viste i det hele og store, at den opnaaede Centrerings af Søjlerne i Forhold til Knivseggene var upaaklagelig. — Af de maalte Forkortelser eller de heraf følgende Spændinger i de fire Punkter kan man under Forudsætning af plant Tværnsnit beregne Momenterne om de to Hovedaxer og heraf igen Excentriciteterne i Forhold til disse Axer. Naar Momentet om Axen 2 kaldes  $M_2$ , maa Spændingsdifferensen for to Tværnsnitspunkter, hvis indbyrdes Afstand, maalt vinkelret paa Axen 2, er  $e_2$ , være  $\Delta\sigma = \frac{M_2 e_2}{I_2}$ , eller  $M_2 = \frac{\Delta\sigma I_2}{e_2}$ ; heri er endvidere  $\Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon$ , hvor  $\Delta\varepsilon$  er givet ved *Okhuizen*-Aflæsningerne. Idet nu Tværnsnittet er symmetrisk om Axen 1, og idet de til en vis Krafttilvæxt svarende Differenser mellem *Okhuizen*-Aflæsningerne (i cm) i de fire Punkter kaldes  $a, b, c, d$ , bliver:

$$\Delta\varepsilon = [\frac{1}{2}(a + b) - \frac{1}{2}(c + d)] \cdot \frac{k}{10 \cdot 500},$$

hvor 10 (cm) er Maalelængden, 500 Forstørrelsesforholdet og  $k$  Korrektionskoefficienten for *Okhuizen*-Apparatet; regnes denne omtrentlig til 0,9, faas med Afstanden mellem Linierne  $a-b$  og  $c-d$ :  $e_2 = 12,3$  cm, og den gennemsnitlige Værdi  $I_2 = 540$  cm<sup>4</sup>, at Momentet  $M_2$  bliver:

$$M_2 = \frac{E \cdot \Delta \varepsilon \cdot I_2}{e_2} = 8300(a + b - c - d),$$

idet  $E$  er sat lig 2 100 000 kg/cm<sup>2</sup>. For smaa Værdier af Trykket i Søjlen hidrører Momentet overvejende fra en Excentricitet af Trykket (eller andre Fejl, der kan bringes til Udtryk gennem en tænkt Excentricitet), mindre fra Udbøjningen. Sættes  $M_2 = Pf_2$ , hvor  $f_2$  er denne Excentricitet, og indføres  $P$  i Tons, medens  $M_2$  ovenfor er udtrykt i kgcm, kan man altsaa beregne Begyndelses-Excentriciteten (Centreringsfejlen) af:

$$f_2 = \frac{8,3}{P}(a + b - c - d),$$

og paa lignende Maade faas Excentriciteten om Axen 1:

$$f_1 = \frac{10,8}{P}[(a - b)\frac{2}{3} + (c - d)].$$

De efter disse Formler beregnede Begyndelses-Excentriciteter, svarende til  $P = \text{ca. } 10^t$  (lidt forskellig for de enkelte Søjler) var: i Udknækningsretningen (Axen 1),  $f_2 = 1,1 - 0,4 - 0,6 - 0,3$  mm vinkelret herpaa (Axen 2),  $f_1 = 1,3 - 2,8 - 2,5 - 1,3$  mm; disse Tal er altsaa endda lidt for store, idet man egentlig skulde sætte f. Ex.  $M_2 = P(f_2 + f'_2)$ , hvor  $f'_2$  er den til Trykket  $P$  svarende Udbøjning. Ved adskillige af Forsøgene viste det sig, at de saaledes beregnede Excentriciteter  $f_2$  og  $f_1$  aftog med voxende  $P$ , hvilket forklares ved, at Søjlernes Endeflader efterhaanden har trykket sig kraftigere ned i Kobberpladerne, hvorved Trykfordelingen er bleven mere ensformig. At de for endnu større  $P$  voxede, hidrører fra Udbøjningernes Indflydelse.

Gennem Spændingsmaalingerne kunde man forøvrigt ogsaa faa en Kontrol paa de maalte Udbøjninger, eller omvendt. For en excentrisk paavirket Søjle med Excentriciteten  $f_2$  er den elastiske Nedbøjning  $f'_2 = f_2(\sec \frac{1}{2}al - 1)$ , hvor  $\frac{1}{2}al = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_E}}$ ; af det maalte  $f'_2$  kan man da ogsaa ad denne Vej beregne Begyndelses-Excentriciteten  $f_2$ . En saadan Beregning blev dog kun udført

i et Par enkelte Tilfælde og viste her en god Overensstemmelse med Beregningen ovenfor. Exempelvis anføres kun følgende Tal: for Søjle Nr. 1 med  $P = 27,9^t$  maalttes  $f'_2 = 0,4$  mm, og man beregner:  $\sigma = 695$ ,  $\sigma_E = 4350$ ,  $\frac{1}{2}al = 0,2 \cdot \pi$ ,  $\sec \frac{1}{2}al - 1 = 0,24$ , og altsaa  $f_2 = \frac{0,4}{0,24} = 1,67$  mm, medens Beregningen efter Formlen ovenfor ved Hjælp af *Okhuizen*-Aflæsningerne gav  $f_2 = 1,63$  mm.

Angaaende Spændingsmaalingerne bemærkes endnu, at hvis de to Vinkeljærn i Søjlen forholder sig som en usammensat Søjle, saa er med de sædvanlige Forudsætninger Spændingstilstanden i et Tværsnit bestemt ved Spændingerne i tre Punkter; naar man maaler den i fire Punkter, har man altsaa en Overbestemmelse, der kan benyttes dels som Kontrol paa selve Spændingsmaalingen, dels som et Bidrag til Besvarelse af Spørgsmaalet, om de to Vinkeljærn virker sammen, som de skal. — Da de fire samtidige Spændingsmaalingen naturligvis normalt ikke nøjagtigt fører til en plan Spændingsfordeling, maa man for at udføre Kontrolberegningen paa uangribelig Maade fastlægge Spændingsplanen ved mindste Kvadraters Methode. Disse Beregninger udførtes for en hel Del af Maalingerne og viste altid ganske smaa og betydningsløse Afvigelser mellem de direkte maalte og de korrigerede Aflæsningsdifferenser. Exempelvis anføres følgende Resultater for Søjle Nr. 4 (*Okhuizen*-Differenserne  $a, b, c, d$  udtrykte i  $\frac{1}{500}$  mm):

$P$ t	$\Delta P$ t	$a$	$b$	$c$	$d$	
2,00						
	8,02	5,2	5,1	5,6	5,0	aflæst
		5,30	5,00	5,54	5,06	korrigeret
10,02						
	17,98	12,5	11,9	12,8	11,9	aflæst
		12,47	11,91	12,81	11,88	korrigeret
19,98						
	28,04	20,0	18,8	20,7	19,0	aflæst
		19,91	18,84	20,72	18,94	korrigeret
30,04						
	38,18	26,7	25,5	28,4	26,4	aflæst
		26,64	25,43	28,34	26,33	korrigeret
40,18						
	47,95	32,9	31,9	36,5	33,1	aflæst
		33,17	31,39	36,16	33,20	korrigeret
49,95						

Det ses, at Afvigelserne mellem Maalingerne og den nøjagtig plane Spændingsfordeling er ganske forsvindende, og heraf følger, at de to Vinkeljærn i alt Fald har virket saa godt sammen, at Spændingsfordelingen er bleven næsten fuldkommen plan.

4. Maalingerne af Afstandene  $a-b$ ,  $c-d$  og  $x-y$  (i Midtertværsnittet) gav, som allerede nævnt, det Resultat, at disse Afstande, og altsaa Tværsnittets Form, holdt sig praktisk talt uforandret helt op til umiddelbart før Udknækningen. Exempelvis anføres følgende Resultater for Søjle Nr. 2:

$P$ t	$a-b$ cm	$c-d$ cm	$x-y$ cm
1,88	13,36	19,68	1,31
30,48	13,35	19,68	1,31
60,00	13,35	19,68	1,32
79,67	13,36	19,69	1,32
83,30	13,36	19,69	1,33
84,60	13,36	19,68	1,33
85,40	13,37	19,69	1,33
87,0	13,20	19,53	1,16
efter Aflastn.	12,94	19,47	1,02

Udknækningen indtraf for  $P=87^t$ ; derefter trykkedes Søjlen yderligere sammen, saa Deformationerne traadte tydeligere frem, og efter Aflastningen maalttes de tre nederst staaende Tal. Disse har derfor ingen anden reel Betydning end den, at de viser, at den for  $P=87^t$  (men ikke før) begyndte Deformation ikke er tilfældig, men virkelig fortsættes videre i samme Retning.

Hovedresultaterne af Forsøgene findes i nedenstaaende Tabel.

Tværsnitsarealerne i Kolonne 2 er, som ovenfor omtalt, fundne ved Vejning, og herudfra er Fligtykkelserne i Kolonne 4 og Inertimomenterne  $I_1$  og  $I_2$  beregnede. De i Kolonne 10 opførte Brudbelastninger er de aflæste Tal, korrigerede ved Tillæg af  $\frac{1}{2}\%$  (Maskinens procentvise Fejl, før Vægtlodderne blev justerede).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Søjle Nr.	$F$ cm <sup>2</sup>	Flig- bredde maalt cm	Flig- tykkelse cm	$I_1$ cm <sup>4</sup>	$I_2$ cm <sup>4</sup>	$i_2$ cm	Fri Længde $l_2$ cm	$\frac{l_2}{i_2}$	Maalt $P$ Tons	Brud- belastn. $P:F$ kg/cm <sup>2</sup>
1	2×19,56	10,0	1,02	920,8	541,6	3,72	257	69	86,2	2203
2	2×19,70	10,0	1,025	924,3	543,8	3,72	257	69	87,4	2218
3	2×19,13	10,0	0,997	910,9	532,4	3,73	398,6	107	60,8	1589
4	2×19,66	10,2	1,00	931,2	570,4	3,81	398,6	104	67,0	1704

Til Bedømmelse af de fundne Tal kan man gaa ud fra, at Søjlerens Brudbelastning bør kunne udtrykkes ved Formlen:

$$\sigma_k = \sigma_B \left( 1 - \frac{1}{30\,000} \left( \frac{l}{i} \right)^2 \right),$$

hvor  $\sigma_B$  tilnærmelsesvis skal være lig Materialets Flydegrænse. Sætter man  $\sigma_k$  lig de observerede Værdier fra Kolonne 11 i Tabellen ovenfor, og beregner  $\sigma_B$  af Formlen, kommer man til de i nedenstaaende Tabel angivne  $\sigma_B$ -Værdier.

Disse skal dernæst sammenlignes med Materialets Flydegrænse, til hvis Bestemmelse der blev udskaaret Prøvestykker af Vinkeljærnene. Det er i Virkeligheden Træk-Flydegrænsen, det her drejer sig om, idet man jo altid fortrinsvis bestemmer den og kun forholdsvis sjældent har bestemt Tryk-Flydegrænsen; naar man mener at kunne sætte Konstanten  $\sigma_B$  i Parabelformlen lig Flydegrænsen, er det i alt Fald altid Træk-Flydegrænsen, man har tænkt paa. — Denne Flydegrænse (samt Træk-Brudgrænsen) maalttes kun for Søjle Nr. 1 og 4, hvorved fandtes de i Tabellen nedenfor angivne Resultater. En Del Forsøg paa at bestemme Tryk-Flydegrænsen tyder paa, at Materialet i Søjlerne 1, 2 og 3 var temmelig ens, medens Søjle Nr. 4 var af lidt haardere Kvalitet; man gaar derfor neppe meget fejl ved at regne med samme Træk-Flydegrænse for de tre første Søjler. Det ses da, at de beregnede  $\sigma_B$ -Værdier stemmer meget pænt med de maalte Flydegrænser ( $\sigma_F$ ); at  $\sigma_B$  for de tre første Søjler endogsaa er lidt højere end  $\sigma_F$ , kan sandsynligvis forklares ved, at den Overhamring, der som ovenfor omtalt er anvendt for at rette Vinkeljærnene, gør sig gældende for hele Søjlen, men derimod ikke for det mindre Prøvestykke, der er brugt til Bestemmelse af  $\sigma_F$ . I alt Fald ses det, at alle  $\sigma_B$ -Værdierne ligger mellem de to observerede Værdier af Flydegrænsen.

Søjle Nr.	$1 - \frac{1}{30\,000} \left( \frac{l}{i} \right)^2$	$\sigma_k$ fra Kol. 11 ovenfor	$\sigma_B$ beregnet	$\sigma_F$	Træk- Brudgr.
1	0,841	2203	2620	2505	3760
2	0,841	2218	2637		
3	0,618	1589	2568		
4	0,639	1704	2667	2805	4025



I Fig. 6 ses en af de lange Søjler opstillet i Maskinen, færdig til Prøvning, og en af de allerede prøvede korte Søjler liggende paa Bordet ved Siden af, i stærkt deformeret Tilstand.

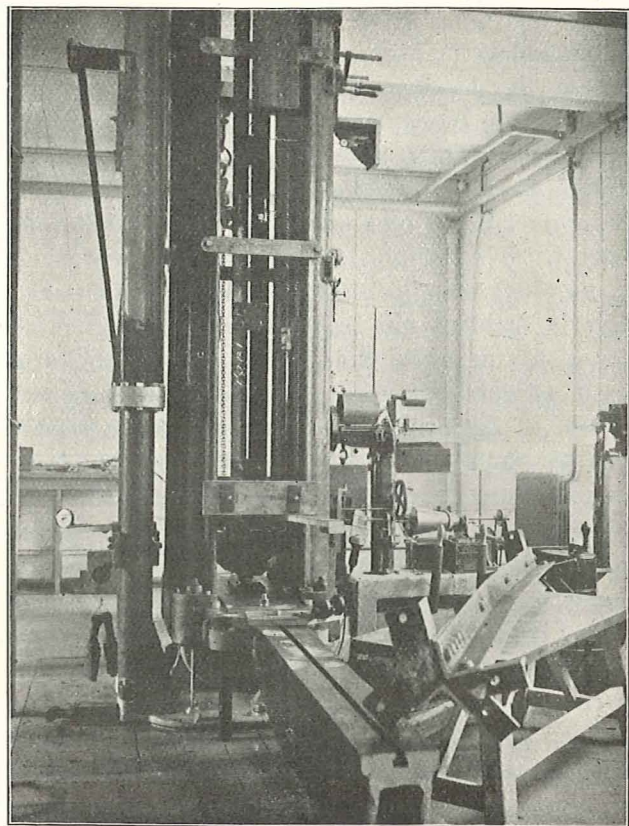


Fig. 6. Fotografi af Maskinen med Søjle opstillet til Prøvning, og en allerede prøvet Søjle ved Siden af.

I Forbindelse med ovenstaaende bemærkes endnu følgende. Der er naturligvis i og for sig ingen fornuftig Grund til, at Konstanten  $\sigma_B$  i Parabelformlen netop skulde være lig Træk-Flydegrænsen. Naar *J. B. Johnson* i sin Tid har fremsat den Antagelse, at  $\sigma_B$  er lig Flydegrænsen, har han sikkert nærmest tænkt paa Tryk-Flydegrænsen og maaske stiltiende underforstaaet, at Tryk- og Træk-Flydegrænserne falder sammen. Og naar det senere ved Bearbejdelse af Forsøgsresultater er bleven

paavist, at  $\sigma_B$  virkelig kan regnes lig Flydegrænsen, har dette ogsaa altid været Træk-Flydegrænsen, ganske simpelt fordi det er den, der har foreligget som bekendt, medens Tryk-Flydegrænsen forholdsvis sjældent er bestemt (og i det hele ikke er saa simpel at bestemme). Man har vel hidtil i Almindelighed tænkt sig, at de to Grænser saa nogenlunde falder sammen, men sikkert kan dette langtfra kaldes, og der foreligger mange Forsøg, der tyder paa, at Tryk-Flydegrænsen ligger noget højere end Træk-Flydegrænsen.

Spørgsmaalet er ikke helt let at afgøre, og jeg haaber at kunne komme tilbage til en nærmere Undersøgelse ved en anden Lejlighed. Her skal blot anføres Resultaterne af et Par Forsøg, der i Anledning af Søjlerne ovenfor blev udførte for at bestemme Tryk-Flydegrænsen. Af Vinkeljærnene i hver af Søjlerne blev der skaaret et ca. 15 cm langt Stykke (med hele Vinkeljærns-Tværsnittet), og hermed fandtes ved Paavirkning til Tryk:

Søjle Nr.	Flydegrænse kg/cm <sup>2</sup>
1	2920
2	2905
3	2955
4	3325

Disse Tal kan maaske nok kaldes Flydegrænsen for de benyttede Prøvestykker; Bæreevnen var i Øjeblikket udtømt, og udvendig set var Forsøgets hele Forløb det samme som ellers ved Flydegrænsen; men det, der skete, var i alt Fald ogsaa, at Vinkelflignene bøjede lokalt ud. Om dette sidste nu er Aarsag eller Virkning, altsaa om den lokale Udbøjning var en Følge af, at Materialets Tryk-Flydegrænse var naaet, saa Tallene betyder Materialets Tryk-Flydegrænse, er naturligvis usikkert, men ikke usandsynligt. — Betragter man dem som Flydegrænse for Materialet, maa man dog erindre, at de er en Slags Gennemsnitsværdier for hele Vinkeljærnstværsnittet og derfor ikke direkte kan sammenlignes med Træk-Flydegrænserne ovenfor, der er fundne med Fladjærns-Strimler, skaarne ud af Vinkelflignene nærmest ude ved de frie Kanter; saaledes som Valsningen foregaar, vil Flydegrænsen altid være noget højere for Materialet inde ved Vinkelspidsen.

Spørgsmaalet om disse Flydegrænser er nemlig ikke uden Interesse for Søjleproblemet. Vil man opstille Beregningen for en centralt paavirket Søjle ud fra den Betragtning, at man skal tage Hensyn til de forskellige i Virkeligheden optrædende Mangler

ved den; og at man f. Ex. kan gøre dette ved at regne med en tænkt Excentricitet  $f_0$ , skal Bæreevnen  $\sigma_k$  findes af Formlen:

$$\sigma_B = \sigma_k \left( 1 + \frac{f_0}{k} \sec \frac{1}{2} \alpha \right) = \sigma_k \left( 1 + \varphi_0 \sec \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_E}} \right),$$

idet  $\frac{f_0}{k}$  er betegnet ved  $\varphi_0$ , og her kan man ikke godt tænke sig andet, end at  $\sigma_B$  maa betyde Tryk-Flydegrænsen. For Søjlelængden Nul,  $\sigma_E = \infty$ , maa da  $\sigma_k = \frac{\sigma_B}{1 + \varphi_0}$ . Efter Parabelformlen skal imidlertid  $\sigma_k$  for Søjlelængden Nul være lig Træk-Flydegrænsen, og dette fordrer altsaa, at Tryk-Flydegrænsen skal være lig  $c \times$  Træk-Flydegrænsen, hvor  $c = 1 + \varphi_0 > 1$ .

Som sagt haaber jeg senere at kunne komme tilbage hertil.

En ny Opgave ude fra Praxis frembød sig for Laboratoriet i Juni 1926, idet Stadsingeniøren i Kjøbenhavn da anmodede det om at »foretage en Undersøgelse af Højbro og Holmens Bro og om muligt fremsætte en Udtalelse om disse Broers Tilstand«. Den første Del af denne Opgave krævede først en Del foreløbige Beregninger, hvortil Stadsingeniøren stillede den fornødne Ingeniør-Medhjælp, og dernæst ret omfattende Belastningsforsøg med Spændings- og Nedbøjningsmaalinger. Om disse Maalinger, der foreløbig kun udførtes paa Højbro, og de deraf udledede Resultater skal her meddeles nogle Oplysninger.

Maalingerne udførtes d. 18.—20de Juli 1927, Kl. 3 $\frac{1}{2}$ —9 Fm., i hvilken Tid Broen holdtes afspærret for den almindelige Færdsel. Der undersøgtes specielt: 1) de sekundære Længdedragere, 2) Gitter-Tværbjælkerne, 3) Hoveddragerne. Til Nedbøjningsmaalingerne anvendtes Griot-Apparater, der fastgjordes til Bro-Overbygningen og altsaa fulgte med denne under dens Nedbøjninger, og som paavirkedes af en »faststaaende« lodret Maaletraad, der var stramt udspændt ved Hjælp af en paa Bunden nedsænket Vægt og en i Traaden indskudt Spiralfjeder. Navnlig af Hensyn til denne Maaletraad observeredes Luft- og Vand-Temperaturen med passende Mellemrum; praktisk talt holdt Temperaturen sig dog konstant under hver Dags Maaling. Til Spændingsmaalingerne anvendtes Okhuizen- og Huggenberger-Apparater med 10 cm Maalelængde og 1000 Gange Forstørrelse,

i et enkelt Tilfælde ogsaa et Berry-Extensometer med 20 cm Maalelængde, 500 Gange Forstørrelse. Anbringelsen af disse Apparater krævede en ret besværlig Afskrabning af Malingen paa de Pletter, hvor Maalingerne skulde foretages.

Som Belastning anvendtes en 10<sup>t</sup> Motortromle med de i Fig. 7 angivne Vægte og Maal.

Den anbragtes i forskellige Stillinger, der var nøjagtigt udmaalte paa Brodækkets Overside; den tungere Bagtromle stilledes altid saaledes, at den havde den

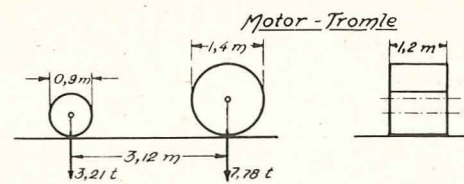


Fig. 7. Tromle.

mest direkte Indflydelse paa den i Øjeblikket undersøgte Konstruktionsdel, og for at faa Trykket saa meget som muligt koncentreret i det ønskede Punkt kørtes den op paa en 13 cm bred Jærnplade. For hver undersøgt Konstruktionsdel anvendtes flere Belastninger og Aflastninger efter hinanden, for at man kunde sikre sig, at Maaleapparaterne gik tilbage til Nulstillingen. — Denne Motortromle er naturligvis meget langt fra at repræsentere den farligste Belastning, der virkelig maa paaregnes paa Broen, men Formaålet med Anvendelsen af Tromlebelastningen var ogsaa kun at skaffe Oplysning om Forholdet mellem de beregnede og de virkelig optrædende Paavirkninger, idet man paa Forhaand var klar over, at der her kunde ventes meget betydelige Afgivelser, paa Grund af Fordelingen gennem det stive Brodæk o. lign. Naar først dette Spørgsmaal var bragt paa det rene, kunde man ved en Beregning forfølge Virkningen af den farligste Belastning.

Angaaende Broens Konstruktion forudskikkes endnu blot, at Hoveddragerne er 3-Charniers-Buer med Spændvidde 18,83 m, Pilhøjde til Top-Charnieret 1,517 m, delt i 15 Fag à ca. 1,25 m og udført som Gitterbue i de fire Fag nærmest Enderne, med massiv Krop nærmest Toppen. Under Kørebanen er Hoveddrager-Afstanden 2,75 m; i hvert Hoveddrager-Mellemrum findes to Stkr. Z-formede sekundære Længdedragere, der hviler paa Tværbjælker i Knudepunkterne (massive nærmest ved Toppen, Gitter-nærmest Vederlagene); Brodækket er ca. 5 mm tykt Bølgeblik med Bølgerne paa tværs, og herover et Betonlag og Brolægning, tilsammen ca. 25—30 cm tykt.

Der kan her ikke være Tale om at referere alle de udførte Maalinger med dertil knyttede Overvejelser og Beregninger. Vi indskrænker os i det følgende til nogle af de mest karakteristiske.

1. De sekundære Længdedragere er, som nævnt, Z-formede, dannede af en  $7'' \times \frac{5}{16}''$  Kropplade og to Vinkeljærn  $3'' \times 2'' \times \frac{1}{2}''$ ,  $\frac{5}{8}''$  Nitter. Længden er 1,25 m, Højden aftager mod Enderne, saaledes at Drageren kan faa Plads ovenpaa Tværbjælkerne. Længdedrageren er ikke kontinuerlig.

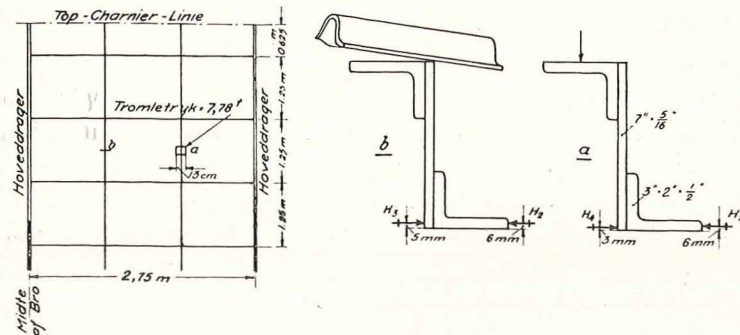


Fig. 8. Højbro, Sek. Længdedrager.

Fig. 8 viser en Situationsplan for de to undersøgte Længdedragere *a* og *b*; Bagtromlen anbragtes midt over *a*, medens *b* var ubelastet. I Midtersnittet af Bjælken *a* maalttes Spændingerne i de to Punkter  $H_1$  og  $H_4$ , der er angivne i Tværnsnittegningen til højre i Figuren, og for Bjælken *b* i Punkterne  $H_2$  og  $H_3$  (ved Huggenberger-Apparater), og desuden maalttes Nedbøjningerne ved Midten og ved Enderne af begge Bjælker (Griot). I nedenstaaende Tabel gives en Oversigt over Aflæsnings-Differenserne for Huggenberger-Apparaterne (i  $\frac{1}{1000}$  mm) og over de maalte Nedbøjninger (i mm) af Bjælkemidterne i Forhold til Understøtningerne.

Den belastede Drager (*a*) maa antages paavirket, som antydet med en Pil i Fig. 8 (Tværnsnittet), med en lodret Kraft, der træffer omtrent midt paa den vandrette Vinkelflig. Heraf synes umiddelbart at maatte følge dels en Vridning, dels en »skæv« Bøjning med lodret Kraftlinie. Vridningen maatte medføre en Bevægelse af den øvre Flange: vandret til venstre, den skæve Bøjning vilde give en Nedbøjningsretning (vinkelret paa Nul-

	$\Delta H_1$	$\Delta H_4$	$\Delta H_2$	$\Delta H_3$	Nedbøjn. ved Midten	
					af Bjælke <i>a</i>	Bjælke <i>b</i>
ubelastet.....	28,7	10,1	- 1,2	+ 5,8	0,68	0,58
belastet.....	26,2	10,0	- 1,5	+ 4,5	0,58	0,43
ubelastet.....	30,0	10,6	- 1,5	+ 5,3	0,48	0,65
belastet.....	30,4	10,6	- 1,1	+ 5,1	0,70	0,65
Middeltal.....	28,8	10,3	- 1,3	+ 5,2	0,61	0,58
Korrektionskoeff. ....	0,974	1,025	1,004	1,044		
korrigeret Middeltal..	28,0	10,6	- 1,3	+ 5,4		

linien): skraat nedad til venstre, altsaa en vandret Nedbøjningskomponent i samme Retning som den fra Vridningen. Nu er imidlertid denne vandrette Bevægelse af den øvre Flange hindret af Nitningen til Bølgeblikket; en begyndende Bevægelse fremkalder et vandret Modtryk fra Bølgeblikket, og dette, sammen med den lodrette Belastning, giver en Kraftlinie, der peger skraat nedad til højre. Den nøjagtige Retning af denne Kraftlinie kendes ikke; mest nærliggende vilde det vel være at tænke sig en saadan Kraftlinie *OT* (Fig. 9), at Nullinien blev vandret, idet kun da Nedbøjningen kan foregaa uhindret af Bølgeblikket. — Trækker man en Kraftlinie med Retningen *OT* og gennem Midtpunktet af den vandrette Vinkelflig, vil den dog ikke nøjagtigt gaa gennem Tværnsnittets Tyngdepunkt og altsaa ikke helt udelukke Vridningen. Og da Vridnings-Forskydningen af den øvre Flange skulde være helt vandret, og altsaa daarligst forliges med Fastnitningen til Bølgeblikket, bliver den sandsynligste Antagelse til syvende og sidst, at den vandrette Komponent af Bølgeblikkets Modtryk netop er saa stor, at den frembringer en Kraftlinie gennem Tyngdepunktet eller i alt Fald en Kraftlinie beliggende indenfor de to nu nævnte Grænsstillinger ( $\neq OT$  og gennem Midtpunktet af øvre Flange eller gennem Tyngdepunktet); forøvrigt afviger disse to ikke meget fra hinanden.

Vi skal dernæst se, hvorledes denne Forhaands-Antagelse stemmer med Spændingsmaalingerne i  $H_1$  og  $H_4$ . De her maalte Spændinger ses for det første at have samme Fortegn, og deres

Størrelser forholder sig som 28 : 10,6. Man kan da uden Vanskelighed finde den heraf følgende Nullinie  $ON$  (Fig. 9), hvis Afstande fra  $H_1$  og  $H_2$  skal staa i det angivne Forhold,  $\frac{11,57}{4,36} = \frac{28}{10,6} = 2,64$ . Den til  $ON$  svarende Kraftlinie  $OK$  viser

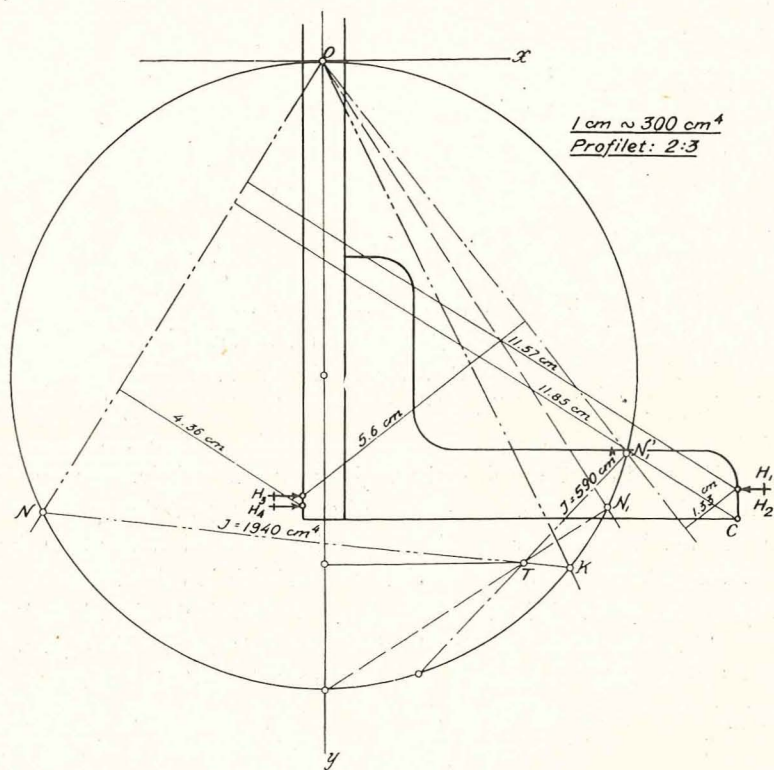


Fig. 9.

sig at falde meget nær sammen med den første af de ovenfor omtalte sandsynlige Grænsestillinger.

For Bjælketværsnittet er (med Fradrag af Nittehullerne):

$$I_x = 2020, \quad I_y = 500, \quad Z_{xy} = 800 \text{ cm}^4,$$

og herudfra har man ved den sædvanlige Land'ske Cirkel (med  $I_x + I_y$  som Diameter, Fig. 9) fundet de sammenhørende Kraft- og Nullinier  $OK$  og  $ON$ , og endvidere Modstandsmomenterne  $W$  for de Punkter, hvis Spændinger er af Interesse. For Nullinien  $ON$  er Inertimomentet  $TN = 1940 \text{ cm}^4$ , altsaa Modstandsmomen-

tet for Punktet  $H_1$  lig:  $W = \frac{1940}{11,57} = 168 \text{ cm}^3$ , og Spændingen i  $H_1$  lig  $\frac{M}{168}$ , naar  $M$  betegner det bøjende Moment i Kraftlinien  $OK$ . — I Punktet  $H_1$  er den maalte Forlængelse pr. Længdeenhed, idet Maalelængden er 100 mm, Forstørrelsesforholdet 1000 : 1:

$$\epsilon = \frac{28}{1000 \cdot 100}, \text{ og med } E = 2 \cdot 10^6 \text{ Spændingen} = E\epsilon = 560 \text{ kg/cm}^2.$$

Den største Spænding, i Punktet  $c$ , er  $\frac{11,85}{11,57} = 1,026$  Gange saa stor, d. v. s. 575 kg/cm<sup>2</sup>.

Det af den belastede sekundære Drager optagne Moment (i Kraftlinien  $OK$ ) maa altsaa ifølge Maalingerne være:

$$M = 128 \cdot 560 = 94\,000 \text{ kgcm},$$

som projiceret ind paa den lodrette Kraftlinie giver Momentet 0,845 tm. Dette Moment er endelig kun ca. halv saa stort som det, man kommer til, hvis den direkte belastede sekundære Drager  $a$  regnes at skulle bære hele Bagtromletrykket.

Ses der nemlig bort fra Vridning og skæv Bøjning og ligeledes fra Brodækkets Fordeling af Tromletrykket over Nabo-Bjælkerne, saaledes at der kun regnes med den fordelende Virkning paa langs af selve Drageren  $a$  (hvorved Tromletrykket 7,78<sup>t</sup> fordeles over 60 à 70 cm Længde, selve Bjækelængden = 1,25 m), faas Momentet:

$$M = \frac{1}{4} \cdot 7,78 \cdot 1,25 - \frac{1}{8} \cdot 7,78 \cdot 0,6 = 1,85 \text{ tm}$$

$$\text{à } M = \frac{1}{4} \cdot 7,78 \cdot 1,25 - \frac{1}{8} \cdot 7,78 \cdot 0,7 = 1,70 \text{ tm};$$

det ifølge Maalingerne virkelig optagne Moment er saaledes kun:

$$\frac{0,845}{1,85} \text{ à } \frac{0,845}{1,70} = 0,46 \text{ à } 0,50 \text{ af det hele Moment};$$

Resten maa af Brodækket overføres til Nabo-bjælkerne, hvorm nærmere nedenfor.

Den ubelastede Drager  $b$  (se Fig. 8) er paavirket mere centralt end Drageren  $a$ , idet Belastningen overføres til den gennem Bølgeblikket, der i Forhold til Drageren  $b$  maa stille sig som antydnet i Fig. 8 (Tværsnittet af  $b$ ); Trykket træffer den altsaa tilnærmelsesvis paa Overkanten af Kroppladen. Man begynder

derfor med at tænke sig Kraftlinien lodret (og Paavirkningen central) og konstruerer den hertil svarende Nullinie  $ON_1$  (Fig. 9). Denne giver nok det rigtige Fortegn for de i  $H_2$  og  $H_3$  maalte Spændinger (at der ved Maalingerne fandtes Træk det ene Sted, Tryk det andet, virkede paa Forhaand lidt overraskende), men ikke helt det ved Maalingen fundne Forhold mellem Spændingernes numeriske Størrelser. En Drejning af Nullinien hen til  $ON'_1$ , hvorved dette Forhold bliver rigtigt, medfører en saa ringe Drejning af Kraftlinien bort fra den lodrette Stilling, at der ikke er noget usandsynligt heri. Der regnes derfor videre med Nullinien  $ON'_1$ .

Ovenfor fandtes, at den belastede Drager  $a$  bar 0,46 à 0,50 af Tromletrykket  $P$ . For nu at komme til et Begreb om, hvor meget den ubelastede Drager  $b$  bærer, kan man tænke sig Brodæk og Bølgeblik som en Bjælke af 2,75 m Længde, understøttet paa Hoveddragerne og desuden i Trediedelspunkterne paavirket af Trykkene  $X_1$  og  $X_2$  fra de sekundære Længdedragere. Disses Inertimomenter regnes lig:  $I_a=1940 \text{ cm}^4$ ,  $I_b=590 \text{ cm}^4$ , svarende til Nullinierne  $ON$  og  $ON'_1$ , hvorom Bøjningen antages at foregaa, medens Brodæks-Bjælkens Stivhed ( $EI$ ) regnes saa stor, at  $X_1$  netop bliver lig den ovenfor fundne Værdi, 0,46  $P$  à 0,50  $P$ . Ved Forsøg er fundet, at det ønskede Resultat naas med  $EI=8EI_a$  à  $6,5EI_a$ ; disse Værdier naar man let op til, uden at man behøver at forudsætte nogen videre stor Bredde af Brodæks-Bjælken, hvis man tænker sig den som en Jærnbetonbjælke (betragter Bølgeblikket som en Armering). —  $X_1$  og  $X_2$  bestemmes ved at sætte Nedbøjningerne af Brodæks-Bjælken og de sekundære Dragere i Krydsningspunkterne lige store. Herved skulde der naturligvis egentlig tages Hensyn til Brodæks-Bjælkens Bredde (Trykfordelingen), hvorved  $X_1$  og  $X_2$  ikke overføres i enkelte Punkter, men paa Strækninger af en vis Længde, men da det dog kun drejer sig om at faa et omtrentligt Begreb om Sagen, ses der bort herfra og regnes med Krydsnings-Punkter. Ligningerne, der udtrykker, at de nævnte Nedbøjninger er lige store, lyder da:

$$X_1 \left( \frac{81}{64} \cdot \left( \frac{l_a}{l} \right)^3 \cdot \frac{I}{I_a} + 1 \right) + \frac{7}{8} X_2 = P,$$

$$X_1 + X_2 \left( \frac{81}{56} \left( \frac{l_a}{l} \right)^3 \frac{I}{I_b} + \frac{8}{7} \right) = P,$$

hvor  $l_a = 1,25$ ,  $l = 2,75$  m,  $I_a = 1940$ ,  $I_b = 590 \text{ cm}^4$  og  $\frac{I}{I_a} = 8$  à  $6,5$ .

Ved Opløsning findes:

$$\text{for } \frac{I}{I_a} = 8: \quad X_1 = 0,46 P, \quad X_2 = 0,114 P,$$

$$- \quad - = 6,5: \quad X_1 = 0,50 P, \quad X_2 = 0,123 P.$$

Regner man med Middeltallene og gaar ud fra, at Momentet for den (med  $X_1$ ) belastede Drager var 0,845 tm, bliver det for den ubelastede (med  $X_2$  belastede) Drager  $\frac{0,119}{0,48} \cdot 0,845 = 0,20$  tm, og dette Moment giver Spændingerne:

$$\text{i } H_3 \text{ (hvor } W = \frac{590}{5,6} = 105 \text{ cm}^3): \quad \sigma = \frac{20000}{105} = 190 \text{ kg/cm}^2,$$

$$\text{i } H_2 \text{ (— } W = \frac{590}{1,33} = 445 \text{ —): } \quad \sigma = \frac{20000}{445} = 45 \text{ — ,}$$

medens de maalte Spændinger i de to Punkter er:

$$\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 5,4}{100 \cdot 1000} = + 108 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{og} \quad - 20 \cdot 1,3 = - 26 \text{ kg/cm}^2.$$

Overensstemmelsen synes maaske ikke videre god, men i Virkeligheden kunde man ikke vente mere, i Betragtning af Beregningsforudsætningernes Usikkerhed. Navnlig maa det fremhæves, at den nyttige Bredde af Brodæk-Bjælken sikkert er variabel, voxende fra Belastningspunktet til begge Sider, og her til skulde der tages Hensyn baade ved Valget af Brodæk-Bjælkens Inertimoment og ved Beregning af de sekundære Bjælkens Momentflader og Nedbøjninger.

Nedbøjningerne af de sekundære Dragere er  $\frac{1}{48} \frac{X_1 I_a^3}{EI_a}$  og  $\frac{1}{48} \frac{X_2 I_a^3}{EI_b}$ ; de forholder sig altsaa som  $\frac{X_1 I_b}{X_2 I_a} = \frac{0,48 \cdot 590}{0,119 \cdot 1940} = 1,22$ , medens Middeltallene af de stærkt svingende maalte Nedbøjninger forholder sig som  $\frac{6}{58} = 1,05$ . — Den absolute Størrelse af Nedbøjningen for Bjælken  $a$  beregnes til:  $\frac{0,48 \cdot 7780 \cdot 125^3}{48 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 1940} = 0,04$  cm, medens den er maalt til 0,061 cm. Ved Beregningen er der her ikke taget Hensyn til, at de sekundære Bjælkens Højde (og altsaa Inertimoment) aftager stærkt hen mod Enderne; til Overensstemmelse kræves blot, at Inertimomentet indfø-

res som  $\frac{2}{3} \cdot 1940$  i Stedet for 1940, hvilket neppe er urimeligt, naar Højden gaar ned til mellem  $\frac{1}{2}$  og  $\frac{2}{3}$  af den paa Midten.

I Betragtning af alle de nævnte Usikkerhedsmomenter giver de opstillede Beregninger dog en meget tilfredsstillende Forklaring af de ved Maalingerne konstaterede Forhold. Hovedresultatet er, at Brodækket er overordentlig stift og virker stærkt fordelende overfor en Belastning med koncentrerede Enkeltkræfter; en sekundær Drager bærer ikke mere end Halvdelen af en direkte over den staaende Enkeltkraft.

2. Paa de sprængeværks-formede Gittertværbjælker anstilledes ligeledes omfattende Maalinger, der gav lignende Resultater angaaende Brodækkets fordelende Evne som ovenfor; Maalingernes Enkeltheder skal derfor ikke reproducere her. Hovedresultatet var:

1) at den totale Normalkraft i de enkelte Stænger ikke naaede op til Halvdelen af det, man vilde finde, hvis hele Tromletrykket overførtes til det belastede Tværbjælke-Knudepunkt, og

2) at de sekundære Bøjnings-spændinger i Stængerne er meget betydelige, i Skraastiverne saaledes ca. 3 Gange, i den vandrette øvre Flangestang ca. 2 Gange saa store som Tyngdepunkts-spændingen.

3. Paa Hoveddragerne udførtes der, som nævnt, Spændingsmaaling i forskellige Punkter, nemlig i et Tværsnit i den massive Bue-Del og for to Flange- og to Gitterstænger. Det vilde føre

for vidt her at gengive alle disse Maalinger; vi indskrænker os til eksempelvis at anføre Maalingerne for det massive Tværsnit og til nogle almindelige Bemærkninger om Resultaterne.

Formen af det undersøgte Tværsnit og de 5 Spændingsmaale-

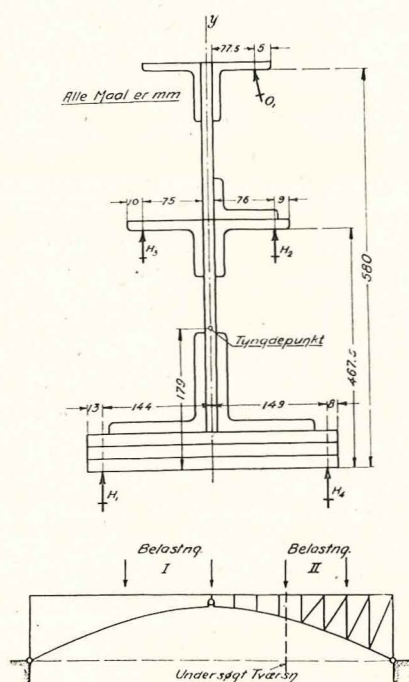


Fig. 10.

res Plads ( $O_1$  betyder et Okhuizen-Apparat,  $H_1 - H_4$  fire Huggenberger-Apparater) ses i Fig. 10, og nederst i samme Figur er skematisk angivet de to anvendte Belastningsstillinger. Maalingsresultaterne er:

	Belastning I					Belastning II			
	$\Delta O_1$	$\Delta H_2$	$\Delta H_3$	$\Delta H_1$	$\Delta H_4$	$\Delta O_1$	$\Delta H_3$	$\Delta H_1$	$\Delta H_4$
ubelastet . . . . .									
belastet . . . . .	+3,5	+2,0		-3,1	-2,9	-15,4	-8,3	+1,4	+1,55
ubelastet . . . . .	+3,05	+1,6	+1,2	-2,95	-2,9	-14,6	-7,5	+1,1	+1,5
belastet . . . . .	+3,05	+1,8	+1,0	-2,95	-2,9	-15,2	-7,8	+1,1	+1,4
ubelastet . . . . .	+3,5	+1,8	+1,25	-2,95	-2,95	-15,2	-7,2	+1,2	+1,4
Middeltal . . . . .	+3,27	+1,8	+1,15	-2,99	-2,91	-15,1	-7,7	+1,2	+1,46
Korrektions-koeff. . . . .	0,865	1,00	1,044	0,974	1,025	0,865	1,044	0,974	1,025
korrigeret Middeltal . . . . .	+2,83	+1,8	+1,20	-2,91	-2,98	-13,1	-8,05	+1,17	+1,50

Af de i Tabellen opførte Differenser finder man Spændingerne i  $\text{kg/cm}^2$  ved Multiplikation med 20.

Ud fra de korrigerede Middeltal er dernæst baade her og ved de andre (ikke her reproducerede) Maalinger beregnet den Plan

$$z = a + bx + cy,$$

hvis Ordinater  $z$  angiver Forlængelserne i de enkelte Tværsnit-punkter. Planen er bestemt enten ved tre af de længst fra hinanden fjernede maalte Punkter, eller hvis der er maalt i mere end tre Punkter og Afvigelsen for 4de (5te) Punkt bliver for stor, paa en saadan Maade, at man finder den sandsynligste Plan (ved mindste Kvadraters Methode).

For Tværsnittet her finder man saaledes ved at gaa ud fra  $H_1$ ,  $H_4$  og  $O_1$ :

for Belastning I:  $z = -2,94 - 0,0024x + 0,10y,$

der giver  $\Delta H_2 = +1,72$  (maalt +1,80),  $\Delta H_3 = +1,75$  (maalt +1,20),

og i Tyngdepunktet:  $z_0 = -1,15$ ,  $\sigma_0 = -23 \text{ kg/cm}^2$ ,  
 i Symmetriaxen foroven:  $z = +2,94$ ,  $\sigma = +59$  — ,  
 i » forneden:  $z = -2,95$ ,  $\sigma = -59$  — ,  
 for Belastning II:  $z = +1,32 + 0,0113x - 0,25y$ ,  
 der giver  $\Delta H_3 = -10,26$  (maalt  $-8,05$ ),  
 i Tyngdepunktet:  $z_0 = -3,14$ ,  $\sigma_0 = -63 \text{ kg/cm}^2$ ,  
 i Symmetriaxen foroven:  $z = -13,37$ ,  $\sigma = -267$  — ,  
 i » forneden:  $z = +1,33$ ,  $\sigma = +27$  — .

Det bemærkes, at de overkomplette Maalingers Afvigelse fra Planen i de allerfleste Tilfælde er saa ubetydelig, at man bevæger sig indenfor de tilladelige Fejlgrænser, og endvidere, at Maaleapparaterne ved de gentagne Belastninger og Aflastninger stadig gik pænt tilbage til Udgangsstillingerne; der er saaledes ingen som helst Grund til at betvivle Maalingernes Paalidelighed. Derimod vilde det have været heldigt, om man havde benyttet en sværere Belastning; paa Grund af den overordentlig stærke Fordeling gennem Brodækket er Virkningen (de aflæste Differenser) i adskillige Tilfælde blevne mindre, og Billedet derfor mere udvisket, end ønskeligt.

Hvis man beregner Spændingerne i 3-Charniers-Buen for den anvendte Tromlebelastning (under den ved Ny-Konstruktioner sædvanlige Forudsætning, at én Hoveddrager bærer hele Belastningen), kommer man til Resultater, der for Belastning II's Vedkommende er mellem 1,0 og 4,8 Gange saa store, som de maalte Spændinger; for Belastning I bliver disse Forholdstal endnu større.

Hertil er strax at bemærke, at man paa Forhaand maatte være forberedt paa noget saadant, efter at Brodækkets overordentlig store Stivhed og deraf følgende fordelende Virkning overfor Enkeltkræfter saa tydeligt er konstateret ved Behandling af Brobanebjælkerne ovenfor. Hertil kommer nu yderligere den Tværstivhed i Konstruktionen, som følger af de mange Forbindelser mellem Hoveddragerne (for hver 1,25 m). Dette Forhold finder ogsaa for Hoveddragernes Vedkommende sin direkte Bekræftelse gennem de udførte Nedbøjningsmaalinger; der maalt Nedbøjningerne i tre Punkter baade af den belastede Bue og i en af de ubelastede Nabo-Buer, og det viste sig, at den sidste

bøjede sig (rundt regnet) halvt saa meget ned som den belastede Bue. Naar Belastningen paa denne sidste kaldes  $P$ , maa hver af de to Nabo-Buer da bære  $\frac{1}{2}P$ , og hver af de to næste Buer  $\frac{1}{4}P$ , saaledes, at den samlede Belastning bliver  $2,5P$ , eller: den direkte belastede Bue bærer kun ca. 0,4 af Tromletrykkene.

Hertil kommer dernæst følgende Omstændighed, som navnlig gør sig gældende for Belastning I. Hele højre Bue-Halvdel (Fig. 11), paa hvilken Maalingerne udførtes, skulde for denne Belastning kun være paavirket af et Tryk efter Forbindelseslinien  $c-d$ , og Spændingerne i

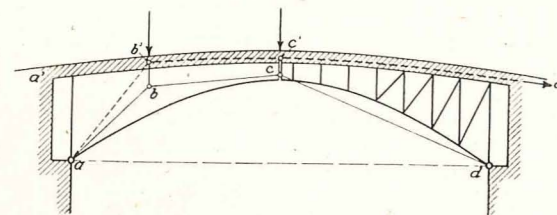


Fig. 11. Hoveddrager-Systemets Virkemaade.

alle de enkelte Konstruktionsled i højre Side skulde altsaa være proportionale med dette Tryk. — I Brobanen er der nu ingen Afbrydelser, hverken over Toppen eller over Endepillerne, og den stive Brobaneplade er endvidere kontinuerligt forbunden med Dragerhovedet (gennem Bølgeblisks-Nitningen) i hele Længden. Følgen heraf er dels, at Brobanepladen ligefrem kommer til at indgaa som en Del af Dragerhovedet, dels at Dragerens Virkemaade som 3-Charniers-Bue paa Grund af de manglende Afbrydelser i Brobanen (ved  $a'$ ,  $c'$ ,  $d'$ ) bliver ganske ændret. Man kan tænke sig alle mulige Mellemstadier mellem 3-Charniers-Buen og en indspændt Bue med meget kraftige Indspændinger ( $a-a'$ ,  $d-d'$ ) og uden Top-Charnier. Specielt for den i Fig. 11 viste Belastning I kan man f. Ex. tænke sig Belastningen optaget, som antydtes i Figuren, paa den Maade at der danner sig to Tryklinier:  $a-b-c-d$ , der væsentlig paavirker den egentlige Jærnbue, og  $a-b'-c'-d'$ , der for højre Bue-Halvdels Vedkommende leder Belastningen helt udenom Jærnbuen. Hvis dette Billede af Kraftoverførelsen var helt rigtigt, skulde alle de for Belastning I maalte Spændinger udgøre den samme Brøkdel af de beregnede Spændinger, men saa simpelt er Sagen ikke paa Grund af Brobanepladens Forbindelse med Dragerhovedet; denne medfører, at der paa hele Strækningen  $c'-d'$  kan overføres Kraft

fra Brobaneplade til Dragerhoved og omvendt, og herved kompliceres Forholdet. Det vil dog forstaas, baade at de maalte Spændinger maa være mindre i Forhold til de beregnede ved Belastning I end ved Belastning II, og at der paa Forhaand er nogen Sandsynlighed for, at Forholdet mellem de maalte og de beregnede Spændinger maa nærme sig mere til at være konstant ved Belastning I end ved Belastning II; ved denne sidste er det sandsynligt, paa Grund af Belastningens Nærhed ved de undersøgte Tværnsnit, at den gensidige Indvirkning mellem Brobaneplade og Jærnbue maa medføre større Forstyrrelser. Begge disse Slutninger maa siges at finde Bekræftelse gennem Maalingerne.

Naar man kombinerer de to fremhævede Omstændigheder — den kraftige Fordeling af Belastningen paa tværs og Ændringen (i Længdesnittet) af Hoveddragerens Virkemaade, idet Brobanepladen ligefrem indgaar som en Del af Drageren, — kan det i Virkeligheden ikke undre, at Forholdet mellem de maalte og de beregnede Spændinger gaar saa langt ned, som ovenfor omtalt.

Selv om man saaledes nok kan forklare sig de fundne Resultater, maa man desværre opgive Haabet om at kunne opstille en ligefrem talmæssig Beregning af Afvigelserne mellem de maalte og de beregnede Spændinger og derigennem, saaledes som for Brobanebjælkernes Vedkommende, naa til et Begreb om den virkelige Sikkerhed, som Hoveddragerkonstruktionen frembyder. Man maa indskrænke sig til at konstatere, at alle de talrige Maalinger har givet langt mindre Paavirkninger i Jærnbuerne, end den almindelige Beregning lader formode og altsaa en langt større Sikkerhed. Naturligvis vilde det være muligt at komme nærmere til Bunds i Sagen, saa man ogsaa talmæssigt kunde angive, hvor stor denne extra Sikkerhed i Virkeligheden er, men hertil vilde kræves betydelig mere indgaaende Maalinger, som navnlig ogsaa maatte udføres for en sværere Belastning. I Øjeblikket syntes en saadan omstændeligere Undersøgelse dog ret unødvendig, idet Sikkerheden selv efter den almindelige Beregning ikke lod stort tilbage at ønske; under disse Omstændigheder var det tilstrækkeligt at vide, at den virkelige Sikkerhed endda var adskilligt større.

Samtidig maa man dog erindre, at det ved Maalingerne konstaterede Sikkerheds-Overskud — udover den Sikkerhed, den almindelige Beregning kan paavise, — alene beror paa den svære og stive Brobanekonstruktion og dennes solide Forbindelse med Jærnbuerne, saaledes at en eventuel Ændring af Brobanekonstruktionen, i Anledning af Vedligeholdelse eller Reparation, maa udføres med Forstaaelse af Forholdene.



# PUBLIKATIONER

FRA

## DANMARKS NATURVIDENSKABELIGE SAMFUND

### A

1. M. RUBNER: Aus dem Leben einer Zelle. 1913. (Pris: Kr. 0,50).
2. NIELS BJERRUM: Nyere Undersøgelser over Atomernes Bevægelser med særligt Henblik paa Kvantehypotesen. 1915. (Pris: Kr. 0,50).
3. KØLPIN RAVN: Om Agerbruget paa St. Croix. 1915. (Pris: Kr. 0,50).
4. FRU KIRSTINE MEYER: Ole Rømer. Ved Afsløring af Ole Rømer Statuen. 1918. (Pris: Kr. 0,50).
5. E. STRÖMGREN: Ole Rømer som Astronom. 1918. (Pris: Kr. 0,50).
6. M. C. HARDING: Ole Rømer som Ingeniør. 1918. (Pris: Kr. 0,50).
7. E. S. MITSCHERLICH: Om Vækstfaktorernes Virkningslov. 1921. (Pris: Kr. 0,50).
8. A. WEGENER: 1) Kontinenternes Forskydning. 2) Jordskorpens Natur. 3) Fortidens Klimater. 1922. (Pris Kr. 0,50).
9. F. C. BECKER, C. JANHOLM og P. E. RAASCHOU: Om Tørringsprocessen. 1925. (Pris: Kr. 0,50).
10. A. OPPERMANN: Nyere Principper i Skovdyrkingen. 1925. (Pris: Kr. 1,50).
11. P. E. RAASCHOU med Assistance af N. C. JANHOLM og A. RANLØV: En Undersøgelse over Varmesøkonomien ved Gasværksovne. 1926. (Pris: Kr. 1,00).
12. Ingeniørkaptajn K. PRYTZ i Samarbejde med Professor G. SCHÖNWELLER og Ingeniør TH. CLAUDI WESTH: Sammenhængen mellem Nedbør og Tilstrømning til Nissum Fjord. 1926. (Pris: Kr. 1,50).
13. P. E. RAASCHOU og V. AHREND LARSEN: En Undersøgelse over Bomuldsstoffernes Paavirkning ved Vask, specielt med perboratholdige Vaskemidler. 1927 (Pris: Kr. 1,50).
14. H. I. HANNOVER: Om Molersten, — en betydningsfuld dansk Specialindustris Udvikling. 1927 (Pris: Kr. 2,50).
- 15a & b. P. O. PEDERSEN: The Propagation of Radio Waves. 1927. (Pris: Kr. 15)
16. A. OSTENFELD: Polyteknisk Læreanstalts Laboratorium for Bygningsstatik 1. 1928. (Pris: Kr. 1,50).

### B

1. A. KNUDSEN: Videnskabens Betydning for Bryggerivirksomheden. 1914. (Pris: Kr. 0,50).
2. H. P. PRIOR: Om industriel Udvikling. 1915. (Pris: Kr. 0,50).
3. G. CLAUDE: Ammoniaksyntesen paa Grundlag af Enormtryk. 1922. (Pris: Kr. 0,50).