



Denne artikkelen er gjengitt i
Norsk vegmuseums årbok for 2021

Soga om nettverkbogane

AV PER TVEIT



Den fyrste nettverkboegebrua i Norge vart bygd på Steinkjer i 1963. Her er Hakkadalsbrua slik ho er no (Foto: Bjørn Ivar Isachsen), og da ho var raud (Foto: Per Tveit)

Soga om nettverkboegane

AV PER TVEIT

Per Tveit (91) er ein av nestorane i brumiljøet i Norge, og mest kjend som mannen bak nettverkboegebruene. Dette er smekre bruer med ein halvboege som berande element, og stenger mellom bogen og vegbanen. Bogen ber trafikklast effektivt, du finn han i underliggende steinkvelv og akvaduktar heilt tilbake i romertida, og i nyare tid på oversida av brua. Den fyrste nettverkboegebrua vart bygd ved Steinkjer i 1963. I dag fins rundt 15 slike bruer i Norge. Brutypen har og vorte brukt internasjonalt; den lengste ligg i Sibir. Konstruksjonen krevjer under det halve av stålmengda i ei konvensjonell bru. Her er hans soge om korleis brutypen kom til.

Mitt avgangsprosjekt frå Norges Tekniske Universitet i Trondheim i 1955 var om berekning av Nielsen-bruer. Dei var utvikla av dansken Oktavius Ferdinand Nielsen.^{1,2} Over 30 Nielsen-bruer var bygde i Sverige mellom dei to verdskrigane.

O.F. Nielsen sine bruer hadde ikkje kryssande stenger. Hovudgrunnane for dette var truleg 1) at det var lite å spare ved kryssande stenger ved dei låge trafikklastene og dei låge materialstyrkane som var i bruk mellom fyrste og andre verdskrig, og 2) at Nielsens berekningsmetodar ville har ført til svært kompliserte utrekningar.

Professor dr. Arne Selberg meinte at Nielsens brutype burde byggast i Norge. Det gav innhaldet i mitt diplomarbeid

Per Tveit er født i 1930. Han er dr. ing. dosent emeritus ved Universitetet i Agder i Grimstad.

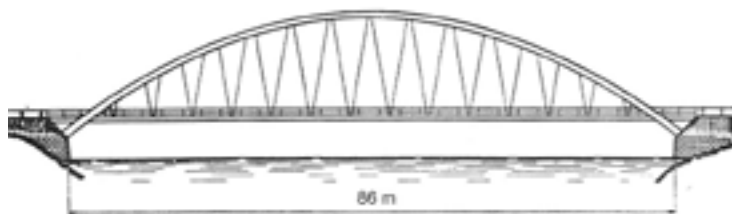
Han vart sivilingeniør frå NTH i 1955 og Dr. ing. frå NTH i 1964. Han har arbeidd med nettverkboegebruer i 60 år.



ved NTH i 1949. I ein svært liten del av dette arbeidet føreslo eg brutypen. Sidan har eg kalla brutypen ein nettverkboege (a network arch). Eg skreiv: «Brutypen vil ha sterkt redusert bøyning i boge og undergurt. Tendensen til knekking i bogen vil også være sterkt redusert.»

Den lengste Nielsen-brua vart bygd i Castelmoron i Frankrike i 1933. Spennvidde 145m.³





O.F Nielsens tegning til brua over Øster-Dalaelva påbegynt i 1921.

I evalueringa av mitt avgangsprosjekt (21.05.1956) skreiv professor Selberg mellom anna: «I oppgaven har han fortapt seg noe i sin patentbro som ligger litt utenfor oppgaven». Vidare skreiv han: «En i og for seg vanskelig diplom for en korrekt bedømmelse». Karakteren vart 2.1 på ein skala frå 1.0 til 6.0.

Då eg hadde laga mitt avgangsprosjekt, fekk eg eit ni månaders stipend for å studera forspent betong i T.H Aachen. Eg likte å studera, og spennbetong var då eit nytt og interessant fagområde.

Då eg kom til Aachen melde eg meg hjå professor Kurt Hirschfeld, som hadde fagområdet betong. Han kasta meg ut. Med min norske bakgrunn visste eg ikkje kor djupt ein skulle bøya seg for ein tysk professor. Eg heldt då fram med mitt arbeid med nettverkbogar.

Ein svært sympatisk professor Philipp Stein hjalp meg mykje. Det vart arrangert at eg skulla få leggja fram mine idéar for den svært berømte professoren Ferdinand Schleicher. Den ærefrykt som omgav denne forfattern av to handbøker var intens. Professor Philipp Stein var også tilstades.

Eg sa at eg var interessert i samanhengen mellom hallinga av hengestenger og deira tendens til å verta slappe. Den berømte professoren skreiv ned ein enkel formel som skulle visa at det ikkje var nokon samheng mellom hallinga av stengene og deira tendens til å verta slappe.

Utan å tenkja meg om, spurde eg professor Stein: «Forstår du dette?». Han svara: «Ja, eg trur det». Kva anna kunne han svara? Eg vende meg då til professor Schleicher og sa: «De har vist meg ein ny måte å tenkja på. Eg seier mange takk for det». Den store professoren forlét rommet. Professor Stein og eg sat att og prøvde å forstå formelen, men me klarde det ikkje. Neste morgon sa professor Stein til meg: «Lat oss bygga ein modell».

Då eg skulle bygga ein modell av ein nettverkboge, var det ei stor hjelp at to professorar i Aachen kjende min professor Rolf Gran Olsson i Trondheim. Ein av dei sa: «Für ein student von Gran Olsson tue ich alles». («Eg vil gjera alt for ein student av Gran Olsson».)

Min to meter lange modell hadde tynne trestykke i boge og brubane. Dei var om lag 3mm tjukke og 30mm breie. Stengene var tynne kopartrådar. Dei var festa i hol fora med metall. Hola likna på hol som ein ofte finn kring skolisser. Ein vennleg apotekar lånte meg små glasflasker som eg fylde med sand. Dei var laster på modellen.

Fleire gonger då eg tilfeldigvis møtte professor Stein i ein korridor på universitetet sa han: «Også eksperiment som gjev uventa resultat, er av verdi. Dei viser oss kva som ikkje kan gjerast».

Kanskje han var uroa for kva eg ville gjera dersom mine eksperimenter gav resultatet som heilt eller delvis stødde det som professor Schleicher hadde sagt.

SAAB i Sverige leverte dei fyrste elektroniske berekningane for ein nettverkboge. Dei låg til grunn for nettverkbogen i Steinkjer som blei opna i 1965.

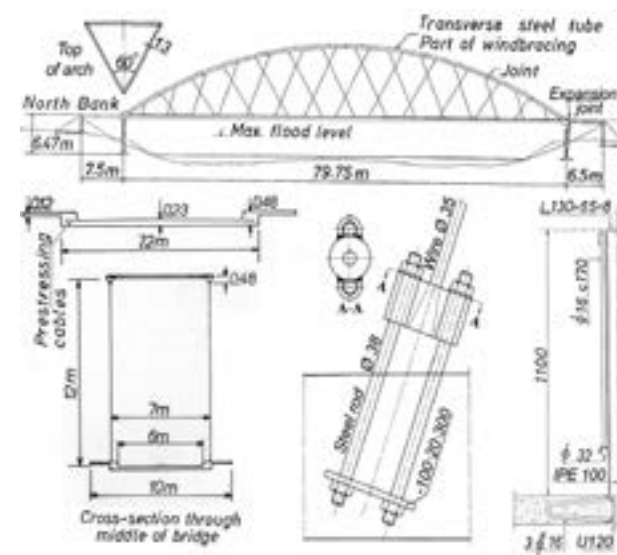
Det uroa meg at ting som for meg var innlysande, var uforståeleg for andre ingeniørar. Eg var redd for at eg skulle verta så avvikande at eg måtte sperrast inne på eit asyl. Heldigvis viste eksperimentera at stengene si halling påverka deira tendens til å bli slappe.

Då eg reste frå Aachen til NTH i Trondheim hadde eg med meg eit anbefalingsskriv frå professor Stein. I Norge var det stipend for studentar som ville ta graden lic.techn. Den graden gav sidan tittelen dr. ing. Stipenda var så små at dei mangla søkarar. Mine foreldre lånte oss borna pengar til vidaregåande studiar. Eg bestemte meg til å laga lic.techn. på nettverkbogar. Eg gjekk då til professor Arne Selberg og bad han om å vera min «doctor father».

Han sa at nettverkbogar ikkje var eit passende emne for ein lisensiatgrad. Litt seinare kom eg att med om lag åtte handskrivne sider som argumenterte for ein lisensiatgrad om nettverkbogar. Frå då av stødde professor Selberg mitt arbeid med nettverkbogar i mellom seks og åtte år.

Eg vart ved institutt for statikk ved NTH i 6 år. Fyrst var eg stipendiat, og sidan assistent. Då professor Selberg fekk hjarteinfarkt, gav eg dei grunnleggande førelesingane i statikk. Likevel fekk eg støtt tid til arbeid med nettverkbogane.

Då det kom ein permanent stilling som assistent i statikk i 1958 søkte eg



den, men den gjekk til professor Selberg sin nevø. Eg var då innstilt på å gjeva opp mitt arbeid med nettverkbogane, men professorane Arne Selberg og Ivar Holand insisterte på at eg fullførde min lisensiatgrad. Det gjorde eg i 1959.⁴

FØRSTE NETTVERKBØGE PÅ STEINKJER

Då eg hadde bestemt meg for ikkje å prøva på å ta patent på nettverkbogar, skreiv eg om nettverkbogar i Arbeider-Avisa i Trondheim.

Kommuneingeniør Einar Sigurd Balgaard på Steinkjer las artikkelen. Han gjekk då inn for at det skulle byggast ein nettverkboge på Steinkjer. Professor Selberg stødde ideen. SAAB i Sverige leverte dei fyrste elektroniske berekningane for ein nettverkboge. Dei låg til grunn for teikningane av influenslinen for nettverkbogen i Steinkjer.

Ein velmeinande tilsett i Vegvesenet fekk flytta saka frå formannskapet til heradsstyret. Min klassekamerat



I 1963 blei det bestemt at Tveits nettverk-boge skulle byggast på Steinkjer i Nord-Trøndelag. Han fekk mykje hjelp og gode råd fra professor dr. Arne Selberg. Byingeniør Sigurd Balgaard var for å bruke nye lovande ideer. Arkitekt Terje Moe gjorde brua vakrere. (Foto: Bjørn Ivar Isachsen)

frå NTH, Bjørn Vik, leverte eit konkurrerande bogebruprosjekt med vertikale stenger. Dette medverka til ein seinare byggestart. Dessutan var stålet forsinka frå stålverket. Brua vart bygd på pelar i elvebotnen. Isgang heldt på øydelegga stillaset. Ein arbeidar mista livet fordi han vart slegen av ein kabel som rauk. Enkelte pelegrupper vart feide bort, og undergurten på brua fekk opptil 2 millimeter breie revner. Arne, bror min, som då var doktor på Levanger, hjelpte til med mellombels forsterking av stillaset. Det var ikkje ufarleg.

I nettverkbogen på Steinkjer var det ikkje noko stengsel mellom stenger og køyrebanane. Derfor vart stengene påkøyrde nokre gonger. Det tolde stengene og brua godt.

BOLSTADSTRAUMEN

Den andre nettverkbogen i Norge vart bygd over Bolstadstraumen, omlag 150 km nordaust for Bergen. Då hadde mor

mi snakka med bror sin om den brutypen som son hennar hadde så stor tru på. Bror hennar var departementsråd i samferdselsdepartementet.

Eg veit ikkje om onkelen min påverka prosessen, men brått fekk eg lov til å konkurrera med Vegvesenet om ei bru over Bolstadstraumen. Begge brualternativa hadde delvis forspent betong i undergurten. Vegvesenet sitt alternativ hadde vertikale stenger og større pilhøgde. Mitt alternativ vart billigast og vart bygd.

Han som hadde laga det tapande framlegget til bru over Bolstadstraumen vart sjef for stålbruer i Vegvesenet i Norge. Eg trudde at dette tala mot at nettverkfogar skulle verta bygde i Norge. Eg reiste då til Christiani og Nielsen i København og arbeidde tre år med tunnelen under Limfjorden.

Seinare ga dr. Mogens Peder Nielsen, som var sjef for Ingeniørakademiet i Aalborg i Danmark, meg arbeid i Aal-



Brua over Bolstadstraumen, med spennvidde 84 m, opna i 1959.⁵ (Foto: Per Tveit)

borg. Wolfgang Grasse i Dresden i Tyskland sende meg mange gode studenter som gjorde stor innsats i utviklinga av nettverkfogar. Ein av dei er Stephan Teich som i 2012 forsvarte ein imponerende doktorgrad om nettverkfogar.⁶

I Norge er det bygd om lag 15 nettverkfogar. Den nordligste er Bøkfjord Bru ved Kirkenes. Stålet vart sett saman på en leker som vart slept frå Tyskland ca. 3000 km til Brustaden og sett på pilane ved hjelp av tidevatnet.

Bøkfjord Bru nær den russiske grensa, med spennvidde 120 meter, opna i september 2017. (Foto: Knut Opeide)





Brandangersundet bru ved utløpet av Sognefjorden er den slankaste bogebrua i verda. Ho har ei spennvidde på 220 meter og var laga i Tyskland. (Foto: Per Tveit)



Bugrinsky Bru i Sibir fra 2010 er den lengste nettverksbogen i verda med eit spenn på 380 meter. (Foto via megaconstruccion.es.net)



Steien bru ved Alvdal vart teken i bruk i september 2016. Den er 88,2 meter lang i eit spenn, og erstattar ei bilbru av stål og ei gang/sykkelvegbru. (Foto: Håkon Aurlien)



Den nyeste gang/sykkelvegbrua utforma som nettverksboge er mellom Opsund og Hafslundsøy rett nord for Sarpsborg, opna 29. september 2017. (Foto: Håkon Aurlien)

Den lengste nettverksbogen i verda er Bugrinsky Bru over Ob i Sibir. Hovudspennet er 380 m langt. President Putin opna brua og gav henne svært positiv omtale.

Eg fekk eit takkebrev frå dei ingeniørane i St. Petersburg som hadde konstruert brua. Dei hadde fått ideen frå eit foredrag som eg heldt i Moskva i 2003.

ESTETIKK

Nettverksbogar er slanke, det er ein føremon. For dersom du ser på ein nettverksboge, så kan du samstundes sjå landskapet og nettverksbogen. Slik er det ikkje når bruene har høge bjelkar.

Ein nettverksboge ser best ut dersom høgda av bogen er omlag 0,15 gonga med spennvidda. Ein litt høgare boge kan kosta litt mindre. Nettverksbogen ser sterkare ut dersom pilhøgda av undergurt er 0,01 til 0,02 gonga med spennvidda.

Brua koster minst dersom bogane er vertikale, men ser ofte betre ut der-

som bogane hallar mot kvarandre. Det er mest aktuelt ved lange bruspenn. Arkitektar og ingeniørar bør samarbeida om utsjånaden av nettverksbogen, men eg meiner at ingeniørane bør få mest å seia.

FRAMTID

Den danske poeten Piet Hein sa: «Det er svært at spå, især om fremtiden.» Likevel vil eg meina at nokre framtidige bruer vil innehalda ein del av de tinga som er omtala i dette avsnittet.

Her er ei liste over nokre føremonar ved bruk av nettverksbogar:

- 1: Ein nettverksboge vil truleg vera den slankaste bogebrua i verda i all framtid.
- 2: Dei slanke gurtane ser godt ut og gøymmer ikkje landskapet bak dei.
- 3: Strekk er dominerande i undergurt og stenger. Alle stenger kan ha same tverrsnitt.
- 4: Undergurt og stenger gjev bogen stor knekkstyrke i bogen sitt plan.
- 5: Nettverksbogar har moderat bøyning i boge og brubane.



Den første nettverkbu som blei bygd i USA var The Providence River Bridge på Rhode Island frå 2007. Brua blei bygd på ei kai ca. 20 km fra brostaden og flytta på plass ved hjelp av pongtongar og tidevatn. (Foto: CDR Maguire)

6: Armert betong trenger oftast meir vedlikehald enn armert betong med ei lett forspenning.

7: Når avstanden mellom bogane er opp til omkring 20 meter kan undergurten være ei betongplate.

8: Betongplata bør ha kantdragarar med spennkablar.

9: Daglege laster vil berre gjeva små revner på tvers i brubana. Det gjer betongen ekstra varig.

10: Den slanke undergurten vil vera ein føremon når bruar skal gå over 100 års flaum eller over anna trafikk. Nokon stader vil dette gjeva kortare ramper.

11: Nettverkbogane har små nedbøyingar og små endetangentar. Difor passer dei til tog med ekstremt høg fart.

12: Nettverkbogar har stor motstand mot jordskjelv fordi dei har eit høgt styrke/vekt forhold. Spennkablane i kantdragarane gjev god motstand mot horisontale vibrasjonar.

13: Effektive montasjemetodar finns. For eksempel kan ein bruka ein mellombels undergurt som saman med bogen kan bera støyping av undergurten.

14: Nettverkbogen er ein robust konstruksjon. Eit par øydelagde stenger vil normalt ikkje gjeva samanbrot.

15: Nettverkbogen har små overflater, difor trengs det lite overflatebehandling.

16: Når ting går godt, kan nettverkbogen spara om lag 50 % av kostnadane og over 60 % av stålet.

Føremonane i overstående liste kan verka overdrevne. Det er knapt tilfellet. Det ville vera dumt å overdriva, når de faktiske tilhøva verkar som ei overdriving. I det siste har eg ofte tenkt at mi forskning har gjort at nettverkbogane tykkjest svært kompliserte. Nettverkbogar med litt mindre halling av stengene enn i brua på Steinkjer vil vera nær optimale. Dei vil likevel vera økonomiske og vakre.



Hellefosbru i Aurdal, med spennvidde 70 meter, vart opna i 2019 til avlasting for den freda Lunde bru. Brua har tre i bogen, og betong i undergurten. (Foto: Håkon Aurlien)

Referansar:

1: Nielsen, O. F. (1929) "Foranderlige Systemer med anvendelse på buer med skraatstillede Hængestenger." ("Discontinuous systems used on arches with inclined hangers", in Danish.) 121 pages. Gad Copenhagen. Ph.D. thesis.

2: Nielsen, O.F. (1932) "Bogenträger mit Schräg gestellten Hängestangen." ("Arches with inclined hangers," in German.) Internationale Vereinigung f. Brückenbau und Hochbau. Abhandlungen 1, 1932. p. 355-363.

3: Tveit, P. (2004) "Network arches for road bridges." Co-authors: Wolfgang Grasse, Stephan Teich, Stephan Wendelin. Arch Bridges IV, Barcelona, Nov. 2004. Advances in Assessment, Structural Design and Construction. P. Roca and C. Molins (Eds.) p. 681-690. ISBN: 84-95999-63-3

4: Tveit, P. (1959) "Bogebruar med skrå krysstillede hengestenger." ("Arch bridges with inclined intersecting hangers," in Norwegian.) Ph.D. thesis presented at the Tech. Univ. of Norway. 64 pages, 78 drawings.

5: Tveit, P. et al. (2014a) "Systematic Thesis on Network Arches". Can be found at <http://home.uia.no/pert/> under the button "Systematic Thesis"

6: Teich, S. (2012) "Beitrag zur Optimierung von Netzwerkbogenbrücken" (Contribution to Optimizing Network Arch Bridges). Ph.D. thesis. ISSN 1613-6934. The whole text can be found at http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/8604/Dissertation_Teich.pdf

Dokumentasjon

Bretting, A. E. (1935). "Inclined Hangers Impart Slenderness to Ribs of 470-Ft. Concrete Arch". Engineering News-Record. April 25, 1935. p. 577-580.

Bretting, A. E. (1936). "Über Bogenträger mit schräg gestellten Hängestängen." ("On arches with inclined hangers," in German.) Internat. Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. Zweiter Kongress, Schlussbericht 1936. p. 514-515.

Tveit, P. (1955) Graduation thesis on arch bridges with inclined hangers. In Norwegian. Delivered in September 1955. At the Technical University of Norway, Trondheim. 76 pages.

Stein, Peter and Wild, H. (1965). "Das Bogentragwerk der Fehmarnsundbrücke." ("The arch of the Fehmarnsund Bridge" In German.) Der Stahlbau, 34(6) Berlin, B.R.D. p. 171-186.

Tveit, P. (2007) "Visit to the Steinkjer network arch 44 years later". ARCH'07, 5th International Conference on Arch Bridges. Madeira, 12-14 September 2007. p. 305-314, © University of Minho. Portugal. ISBN: 978-972-8692-31-5

Informantar:

Björg Dæmring Berge, Einar Magne Straume, Odd Heland, Margot Langhelle, Nils Grøsvik, Ottar Dalseid, Terje Dalseid, Lars Eide, Oddvar Eikefet, Arnfinn Ansok og Per Steffen Myhren.