

*Bygningsretningen ved
DTU gennem 150 år*

Hasse Lundgård Andersen

Bygningsretningen ved DTU gennem 150 år

Hasse Lundgård Andersen

Indhold

5	Forord
6	Introduktion
7	Et fagområde fødes
7	Ingeniørernes tidlige historie
8	Holmberg og Herholt
9	Systematisering
10	Ostenfeld-æraen
11	Jernbeton
12	Vækst og specialisering
12	Symbiose
14	Krig og besættelse
16	Lundtofte-sletten
17	Laboratoriet for Varmeisolering
17	Man on the Moon - lavenergihus på jorden
18	Nye og dog velkendte problemstillinger
18	Arktisk teknologi
19	Laboratoriet for Landmåling
20	Fotogrammetri og elektromagnetisk afstandsmåling
20	Digitale kort og GPS
21	Fra teknisk tegning til grafisk kommunikation
22	Landtransport
23	Trafikteknik
23	Fokusskifte
24	Nærdemokrati, byøkologi og komplekse teknologiske bysystemer
25	Transport
26	Spændbeton
27	Institut for Husbygning og Byplanlægning
28	Bæredygtigt byggeri
29	Nye materialer og konstruktioner
29	Vandbygning
31	Hydrodynamik
31	Teknisk geologi og teknisk hygiejne
31	ISVA
32	Brændingszonen
32	Iltsvind
34	Nordsøen
34	Storebæltsbroen
34	Erosion
36	Laboratoriet for Bygningsteknik
36	K. W. Johansen
37	TV-master
37	Storrumssiloer
38	Svendborgsundbroen
38	Mogens P. Nielsen
39	Niels Jørgen Gimsing og Danmarks Ingeniørakademi
40	Storebæltsbroen
41	Øresundsbroen
41	Serviceliv
44	Referencer

Forord

Fra BYG•DTU

Da vi besluttede at fejre bygnings-ingeniøruddannelsens 150 års jubilæum i 2007, var det under mottoet: "Fremtidens Bygningsingeniør", og de fleste af jubilæumsårets arrangementer har peget fremad. Men ingen kan forstå nutiden og forberede sig på fremtiden uden at kende fortiden. Derfor iværksatte DTU's Institut for Byggeri og Anlæg arbejdet med dette jubilæumsskrift, som skitserer bygningsingeniørfagets historie ved DTU.

Arbejdet er udført af Teknologihistorie DTU. Den historiske research og sammenskrivning er udført af cand. mag. Hasse Andersen under en kort tidsfrist og inden for stramme økonomiske rammer.

Alligevel er det lykkedes at beskrive, hvorledes bygningsfaget ved DTU bestandigt har været i direkte kontakt med den samfundsmæssige og internationale teknologiske udvikling, og hvorledes det polytekniske ingeniørideal om naturvidenskabeligt baseret teknologiudvikling, Scientific Engineering, lige fra fagets grundlæggelse har været et bærende fagligt princip, som også rækker ind i fremtiden.

Jeg ønsker at takke alle, som har bidraget med indsigt, viden og faglig kritik til skriftet. Tak til firmaer og personer der har stillet billeder til rådighed for publikationen.

Ligeledes skal lyde et stort tak til COWIfonden, Birch & Krogboe Fonden og Knud Højgaards Fond. Uden deres økonomiske støtte var skriftet ikke blevet til noget.

Jacob Steen Møller
Institutdirektør
BYG•DTU

Fra forfatterens

Hensigten med dette festskrift er at skitsere hovedlinjerne i DTU's bidrag til forskning og samfund inden for bygningsretningen. Den metode, der er anvendt her er at fageksperter fra centrale områder er blevet interviewet og den herigennem indsamlede viden er sammenholdt med skriftlige kilder. De interviewede eksperter har med stor venlighed også gennemlæst og kommenteret tidlige udkast til skriftet.

Der har kun været 4 måneder til at dække en meget lang periode og meget store fagområder. På en så begrænset plads som her, og med så begrænset tid til rådighed, er det nødvendigt at udvælge, hvad der fortælles om. De faglige eksperter er måske ikke alle enige i den prioritering, der er foretaget, og det skal ikke lægges dem til last, hvis der er opstået misforståelser. Under alle omstændigheder skal der fra min side lyde en stort tak til de involverede personer.

Hasse Lundgård Andersen
Projektmedarbejder, forfatter
Teknologihistorie DTU
Oktober 2007

Introduktion

Bygningsretningen ved Danmarks Tekniske Universitet fejrer 150-års jubilæum 16. november 2007. Hensigten med dette festskrift er at skitsere hovedlinjerne i bygningsretningens bidrag til forskning og samfund i perioden med særlig hovedvægt på tiden efter 1940.

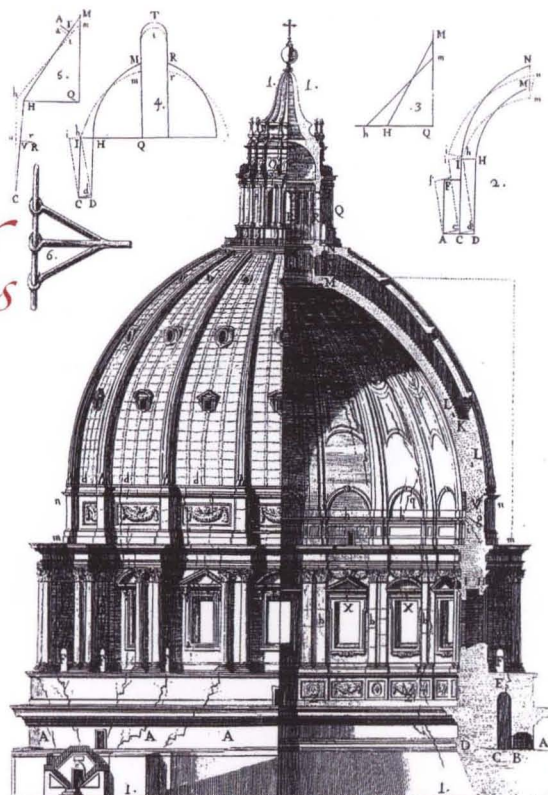
Ingeniørens image i samfundet har undergået forandringer igennem årene. I slutningen af 1800-tallet blev ingeniøren en kraftig heroiseret i både Danmark og udlandet. Bygningsingeniøren var her forholdsvis anonym i forhold til andre ingeniørgrupper. Men som det fremgår af dette festskrift var bygningsingeniørernes bidrag til industrisamfundet essentielt, idet de etablerede infrastrukturen, der var nødvendig for den videre udvikling.

De civile bygningsingeniører kom i fokus i perioden 1900-1940, hvor broer bredte sig ud over det danske landskab og hvor op mod 15 % af den danske ingeniørstand arbejdede i udlandet på store bygge og anlægsprojekter. Efter 2. Verdenskrig mistede faggruppen prestige, da højteknologi og miljøspørgsmål kom på den offentlige dagsorden.

Energikriserne i 1970'erne understregede dog et øget behov inden for bygge- og anlægssektoren for den klassiske ingeniør-kompetence, nemlig at fremkomme med omkostningseffektive tekniske løsninger på praktiske problemer baseret på naturvidenskabelig indsigt og rationelle kalkuler. Vedtagelsen af faste forbindelser over Storebælt og Øresund i henholdsvis 1987 og 1991 tik en tilsvarende fornyende effekt inden for de centrale bygningstekniske fagdiscipliner.

Generelt kan man gennem det 20 århundrede se at det polytekniske ingeniørideal om naturvidenskabeligt baseret teknologiudvikling har båret frugt. Nye byggematerialer muliggør hidtil usete bygningskonstruktioner. Samtidigt har ingeniørfaget fokuseret på bæredygtighed. Dette gør at bygningsingeniøren er ved at genvinde sin prestige.

Et fagområde fødes



Ingeniørernes tidlige historie

Ingenium betegner bl.a. intellekt og genialitet på latin og blev i Middelalderen tillige anvendt som betegnelse for krigsmaskiner. Ingenium udviklede sig derfra til en egentlig fagbetegnelse for officerer videreuddannet i tekniske færdigheder og videnskabelige discipliner med henblik på at kunne konstruere holdbare forsvarsværker m.v., heraf betegnelsen ingeniør ¹.

Militæringenjører fandt også beskæftigelse i forbindelse med offentlige anlægsarbejder og i civile sammenhænge. I 1700-tallet blev uddannelsen af ingeniører i de større lande frigjort fra militæret, primært for at modernisere samfundets infrastruktur. Med industrialiseringen kom betegnelsen ingeniør til også at omfatte konstruktører af maskiner uanset uddannelsesbaggrund.

Sideløbende hermed pågik en videnskabeliggørelse af ingeniørfaget med udgangspunkt i den naturvidenskabelige revolution i 1600- og 1700-tallet. Indsigten i fysikkens naturlove blev anvendt til at opstille matematiske ligningssystemer både til rationel beregning og grafisk visualisering af de kræfter, der bestemmer bygninger, broer, veje, rørledninger og andre bærende konstruktioner.

I 1742 fik tre italienske matematikere til opgave af paven at beregne stressfordeling i Peterskirkens kuppel, hvor der var fremkommet alarmerende brud. De reducerede spørgsmålet til et om statik, og dermed de fysiske naturlove, ved at opdele kuplen trigonometrisk i retvinklede trekanter. Stik af Le Seur, Jacquier og Boscovic.

På dette tidspunkt var man allerede begyndt at undersøge materialers elastiske egenskaber i forløbere til laboratorier. Introduktionen af jern og i særdeleshed stål i byggeriet, jernbanens gennembrud samt stærkt øgede ambitioner i de stillede anlægsopgaver dannede i 1830'erne baggrund for etableringen af en systematiseret matematisk-naturvidenskabelig bygningsstatik ².

Frankrig var i en førerrolle, mens den traditionelle tilgang til ingeniørfaget, som var en slags mesterlære baseret på opsamlet praktisk erfaring, fortsatte i England og til dels i USA. Denne engelske tradition endte brat med Tay Bridge ulykken i 1879, hvor 79 mennesker mistede livet da en mindre ned to år gammel jernbanebro kollapsede under en storm ³.

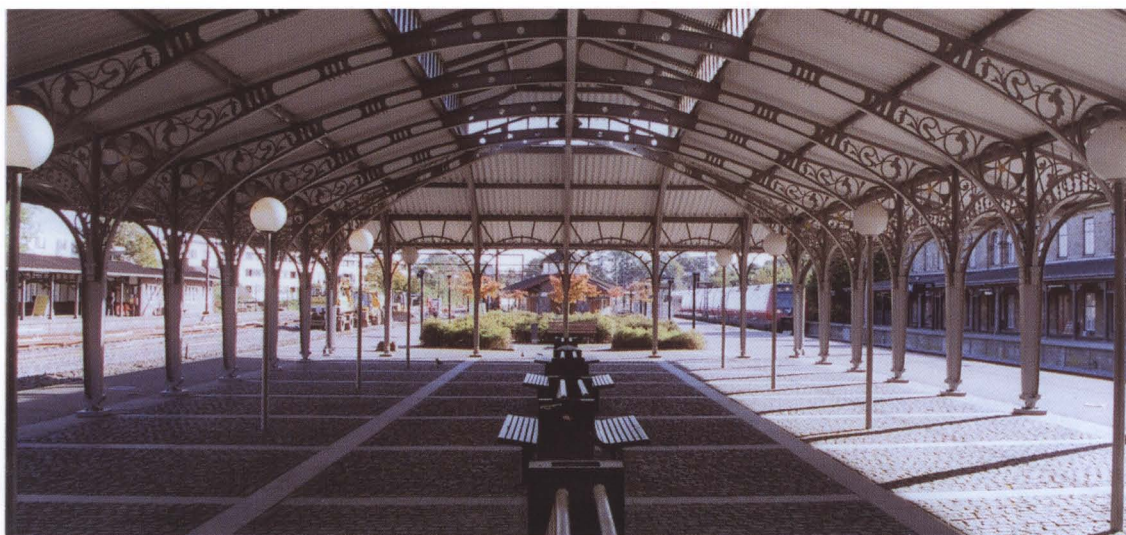
Holmberg og Herholt

Militæringenjørerens uddannelsesmonopol blev kun delvist brudt i Danmark med oprettelsen af Den Polytekniske Lærestalt i 1829, idet undervisningen i begyndelsen var begrænset til en maskin- og en kemiretning. Udover de tekniske kernefag modtog de ingeniørstuderende ved maskinretningen undervisning i jordbundslære og deskriptiv geometri og medvirkede i de følgende år ved diverse offentlige anlægsopgaver. Det var dog nødvendigt at tilkalde udenlandske ingeniører ved anlæggelsen af de første danske jernbaner og gasværker, hvilket stred mod den national-liberale tidsånd. Kolera-epidemien i København i 1853 understregede også, og på tragisk vis, det uholdbare i, at der ikke var uddannet ingeniører i Danmark til at rådgive om og udføre kloakering.

Det danske tekniske uddannelsessystem, herunder ønsket om en civil bygningsingeniøruddannelse, debatteredes livligt fra 1840'erne og fremad. Det blev blandt andet overvejet at lægge lærestalten ind under Københavns Universitet eller den Militære Højskole fra 1830⁴. Man valgte at bevare Polyteknisk Lærestalt og en pengeindsamling blandt de studerende ved Lærestalten i 1857 sikrede oprettelsen af et fireårigt uddannelsesforløb til civil bygningsingeniør med start 16. november samme år. Uddannelsen var i vidt omfang fælles med maskinretningen, hvis lærere underviste i teknisk mekanik, der omfattede jernbroer og andre jernkonstruktioner. Bygningsingeniørstuderende blev desuden undervist i tegning og geologi af lærere fra geologi-studiet. De egentlige byggetekniske fag var samlet under



Ludvig Ferdinand Holmberg var pioner på Polyteknisk Lærestalt og for bygningsfaget i Danmark. Han var den første docent i 1857 og blev professor i 1894. Her er han fotograferet sammen med studerende på lærestalten i Studiestræde/Skt. Pedersstræde. (Foto: www.past.dk)



Klampenborg Station blev bygget 1863/64. Profilerne, der bærer perrons tagkonstruktionen, er dermed blandt de tidligste eksempler på anvendelse af jern i anlægsbyggeriet i Danmark (Foto: Forfatteren, 2007).

henholdsvis Vand- og Vejbygning samt Borgerlig Husbygningskunst.

Til at lede undervisningen i førstnævnte blev den 31-årige Ludvig Ferdinand Holmberg ansat. Han var uddannet såvel landmåler som maskiningeniør og kom fra en lederstilling ved Københavns Havnevæsen, hvor han havde projekteret flere broer.

Arkitekten Johan Daniel Herholdt varetog fra 1860 undervisningen i Borgerlig Husbygningskunst, der var det underordnede element i B-retningen. Bolig- og erhvervsbyggeriet herhjemme havde endnu ikke nået et niveau, hvor formaliserede ingeniørkunderskaber var en nødvendighed.

Systematisering

I den indledende fase af videnskabeliggørelsen af bygningsingeniørfaget i Danmark var sigtet ikke grundforskning, men etablering af et sammenhængende undervisningsforløb og frembringelse af videnskabeligt funderede undervisningsmaterialer på dansk. Holmberg var medforfatter til *De mekaniske Grundlove for Bygningsvæsenet* (1871) og *Lærebog i teknisk Mekanik* (1879) og skrev efterfølgende de første dansksprogede undervisningsbøger i vej- og jernbanebygning, fundering, kanal- og brobygning.

Forlægget var i alle tilfælde udenlandske standardlærebøger, men med reference til hjemlige forhold. Holmberg fortsatte som havnebygmester efter sin ansættelse og blev udnævnt til titulær professor i 1869, altså professor uden universitetsansættelse.

Den senere danske Nobel-prismodtager i litteratur Henrik Pontoppidan studerede ved Polyteknisk Læreanstalt og hånede i sit hovedværk *Lykke* Per Holmberg for i sin undervisning at gennemgå principperne bag såvel konstruktion som anvendelse af hakke og trillebør.

For flertallet af ingeniørstuderende var idealet self-made ingeniører fra især Storbritannien, som med spektakulære skibe og jernbanebroer på referencelisten og barsk sprogbrug forekom at være sande bærere af samtidens teknikbegejstring. Holmbergs kritikere korrigerede senere deres karakteristik og fremhævede hans åbenhed og retfærdighed samt systematiske tilgang til bygningsingeniørfaget og hans internationale udsyn⁵. Holmbergs forskningsmæssige svagheder kolliderede på den anden side med den hastige, tekniske udvikling inden for bygge- og anlægssektoren.

I 1892 overtog den 32-årige cand. polyt. Alfred Lütken, undervisningen i vej- og jernbanebygning



samt brobygning, mens Holmberg fortsatte som underviser i vandbygning til sin død fem år senere. Holmberg havde været en bærende kraft i bygningsingeniørernes tidlige historie i Danmark. Perioden var sammenfaldende med den gryende industrialisering, og det afledte behov for opbygningen af en tidssvarende infrastruktur, en opgave som den danske ingeniører overtog fra de udenlandske ingeniører fra 1860'erne og fremad. Med Holmbergs død var en æra i bygningsingeniørernes historie slut, men en ny var på nippet til at begynde.

Ostenfeld-æraen

I perioden 1900-1940 oplevede de danske ingeniører en guldalder, hvor op mod 15 % af ingeniørstanden arbejdede i udlandet. Broer, havne, jernbaner og tunneller var centrale ekspertiseområder, og det skyldes ikke mindst Asger S. Ostenfeld. I 1894 fik Teknisk Mekanik status som et selvstændigt fag under B-retningen ved overførsel af undervisningen i bygningsmekanik, grafisk statistik, jernbroer og andre jernkonstruktioner fra maskinretningen.

Den 28-årige civilingeniør Asger S. Ostenfeld underviste i det nye kernefag. Han havde arbejds erfaring fra projektering af jernbaner på Vestsjælland og fra Københavns Havnevæsen. Et halvt års matematikstudier var det også blevet til. Udfordringen for Ostenfeld var at ajourføre udbuddet af danske lærebøger og hertil var formidling af udenlandsk lærebogsstof ikke længere tilstrækkeligt grundlag ⁶.

Anlægsbyggeriet rejste til stadighed nye tekniske og teoretiske problemstillinger, som krævede en forskningsindsats for at kunne løses rationelt. Eftersom de manuelle beregninger af bygnings- og anlægskonstruktioner beslaglagde stadig mere tid på tegnestuerne, var det bydende nødvendigt at fortsætte konventionel praksis og opstille reducerede ligningssystemer. Disse indeholdt de vigtigste ligninger, der samlet bestemte dimensioneringen af

en konstruktion. Menneskeliv og store pengesummer stod på spil, hvorfor de beregnede resultater per tradition blev ganget op med en sikkerhedsfaktor. Det overforbrug af materialer, som fulgte, kunne der ikke længere ses bort fra i lyset af de stadig større anlægsopgaver. Da hensynet til sikkerheden ikke kunne fraviges, og ligningssystemer med en højere detaljeringsgrad rejste uløste beregningsproblemer, var et bedre materialekendskab en forudsætning for lettere konstruktioner og dermed større kreativ frihed.

Ostenfeld satte derfor ind på en systematisk afdækning af jerns egenskaber for en statisk konstruktion. Jern er som andre metaller et elastisk materiale og tåler relativt kraftige stræk- eller trykpåvirkninger uden at deformere permanent. Han tog i 1896 til USA og Storbritannien for at studere broer og udgav i 1898 lærebogen Teknisk Elasticitetslære. På basis af foreliggende forsøg med smedjernsøjler opstillede Ostenfeld en brugervenlig og effektiv matematisk formel til grafisk beregning af søjler ⁷. Disse var hidtil konstrueret til at modstå et perfekt centreret tryk, men indgik tillige i gitterkonstruktioner som trækstænger. Utilstrækkelig dimensionering af søjler havde bevirket en række spektakulære brokollaps og skabte international bevågenhed omkring Ostenfelds arbejder. Han blev han udnævnt til professor i 1900 og udgav samme år første bind af lærebogen Teknisk Statik, der også udkom på tysk og med planer om en engelsk-amerikansk oversættelse.

Jernbeton

I 1905 ændrede Teknisk Mekanik fagbetegnelse til Bygningsstatik og Jernkonstruktioner. Ostenfeld udgav i de følgende år tre lærebøger om anvendelsen af jernkonstruktioner generelt, i boligbyggeri samt i brobygning. Han opstillede endvidere retningslinjer for rationel beregning af pæleværker i forbindelse med fundering af bropiller, havne- og moleanlæg. Ostenfeld behandlede åbne broers sidestivhed,

Universitetsbiblioteket i Fiolstræde. I 1800 tallet var det normalt, at avancerede husbygningskonstruktioner eksempelvis kuplen over Det Kongelige Teater blev lavet af militære ingeniørkaptajner. Det ændrede sig med oprettelsen af faget Borgerlig Bygningsskunst ved Polyteknisk Lærestalt. Forud for sin tiltræden som fagansvarlig i 1860 havde J. D. Herholdt udarbejdet dristige konstruktioner bl.a. til Universitetsbiblioteket i Fiolstræde. Han var også manden bag Københavns nye hovedbanegård fra 1864, hvoraf ankomsthallen står endnu og rummer Paladsbiografen (Foto: Karsten Bidstrup, gengivet med tilladelse fra POLFOTO).

hvilket var afgørende for vurdering af vindbelastningen. Inspirationen kom fra Ostenfelds undervisningsassistent P. M. Frandsen, der søgte at modellere vindtrykket numerisk. Harald Young Dahlstrøm blev i 1911 som 33-årige udnævnt til professor i bygningsstatik ved siden af Ostenfeld. Faget oprustede også på anden vis. Fra 1909 kunne de studerende ved bygningsretningen vælge at udføre eksamensprojekter i enten vejbygning, vandbygning, bygningsstatik eller jernkonstruktioner. Efter 1916 indgik brobygning ikke længere under vejbygning, men under fagområdet Bygningsstatik og Jernkonstruktioner, der ydermere fik tilføjet Jernbetonbroer til titlen. Ostenfeld udgav samme år lærebogen *Jernbeton-Broer*.

Jernbeton var en fransk opfindelse fra midten af det 19. århundrede. Beton består af sand, sten og cement og har en høj modstandsdygtighed over for trykpåvirkninger modsat jern, der til gengæld har en høj trækstyrke. Støbes beton udover eller omkring et net af jerntråd eller -dragere styrker de to materials egenskaber hinanden. Fabriksfremstillede bjælker, etageadskillelser og søgar hele brobuer af jernbeton kom på markedet i slutningen af 1880'erne. Den alternative byggeteknologi slog hurtigt igennem under mottoet "Jernbeton bevarer sig uforandret i Luft, Ild og Vand".

Nyudklækkede bygningsingeniører som Rudolph Christiani og A. C. Monberg oprettede umiddelbart efter århundredeskiftet rådgivende ingeniørfirmaer med speciale i det nye byggemateriale, der hurtigt udviklede sig til dynamiske entreprenørselskaber både på hjemmemarkedet og i nabolandene. Efter spørgslen efter bygninger og anlæg i jernbeton i Danmark var bredt sammensat, hvorfor konstruktionsopgaverne typisk indeholdt et væsentligt element af grundforskning givet de begrænsede praktiske erfaringer på området. Tendensen blev forstærket derved, at danske entreprenørvirksomheder selv fremstillede byggeelementer af jernbeton.

Ostenfeld virkede som rådgiver for Christiani & Nielsen, men forblev i bund og grund jernmand. I almenhed var fagkundskaben mildt skeptisk over for anvendelsen af jernbeton i anlægskonstruktioner, trods en lav fremstillingspris og beskedne vedlige-

holdelseskrav.

Eduard Suenson fik, som underviser i materialelære ved Den Polytekniske Læreanstalt og fra 1916 som professor i faget samt jernbetonkonstruktioner, afgørende betydning for udarbejdelsen af videnskabelige metoder til beregning og vurdering af jernbetonkonstruktioner. I 1922 blev P. M. Frandsen udnævnt til professor i Bygningsstatik og Elasticitetsteori med jernbeton som emneområde. Han bidrog til teorien om beregning af paralleldragere, kupler, vandbeholdere og plader ved hjælp differensligninger.

Det skal dog understreges, at Ostenfelds forskning og undervisning i bærende konstruktioner og bygningsstatik havde en indirekte betydning for jernbetonens udbredelse i Danmark, som vanskeligt kan overvurderes. At udelukkende beregne sig frem til matematiske modeller var fra Ostenfelds synspunkt en blindgyde, hvilket afspejlede sig i hans energiske arbejde for oprettelsen af et byggestatisk forskningslaboratorium ved Den Polytekniske Læreanstalt (1926) og Dansk Selskab for Bygningsstatik (1928) ⁸.

Vækst og specialisering

Med væksten særligt i anlægsbyggeriet i 1900-tallet begyndte en ny fase i videnskabeliggørelsen af bygningsingeniørfaget karakteriseret ved en teoretisk formalisering inden for flere af de discipliner, hvor en deskriptiv-empirisk tradition fortsat dominerede ⁹.

Landmåling ved Den Polytekniske Læreanstalt fik bevilliget et professorat i 1911, men blev dog primært betragtet som et redskab for bygningsingeniører og nød ikke større anseelse blandt de øvrige byggetekniske fag.

Undervisningen i kloakering, ventilation m.v. blev lagt over i faget Teknisk Hygiejne i 1921, der fik civilingeniør J. T. Lundbye som professor. Han forskede i spildevand og forurening hermed og slog tidligt til lyd for anvendelse af biologiske metoder til karakterisering af et vandløbs renhedsgrad. I 1928 blev faget vandbygning splittet i Laboratoriet for Hydraulik og Laboratoriet for Havnebygning og Fundering.

Laboratoriet for Hydraulik havde strømningsmod-



*Den gamle Lillebæltsbro. Et lokomotiv med vogne udøver en tryk- og stødbelastning på underlaget, der ikke tåler sammenligning inden for landtransport. Jernbanebroer og viadukter blev således en særlig drivkraft og udfordring i den bygningstekniske udvikling. Med 35 meter er bropillerne, der bærer den første Lillebæltsbro bygget 1933 - 35 med Anker Engelund som konstruktør, den dag i dag de dybest funderede i Danmark
(Foto: Gengivet med tilladelse fra POLFOTO).*

stand i rørledninger, grundvandets bevægelser i jorden etc. som forskningsområde og fik den senere professor J. Munch-Petersen som leder. Han havde i 1914 påvist, at bølgeenergien og ikke de almindelige havstrømme var den altafgørende kraft bag materialebevægelsen langs kyster og dermed tilsandingen af havneindløb m.m. Munch-Petersen opstillede ud fra den indsigt en matematisk formel til beregn-

ing af materialevandringens størrelse og retning på sandkyster, hvori vind- og bølgeretningen indgik som parametre.

A. R. Christensen, kaldet Sablen på grund af hans militære baggrund, blev i 1917 udnævnt til professor i vejbygningsfagene efter Lütken. Christensen var initiativtager til Dansk Vejtidskrift og skrev i første halvdel af 1920erne lærebøger med titler som

Jernbaners Overbygning på fri Bane, Byplaner og Sporveje samt Veje og Gader ¹⁰.

Vejbygningsfaget blomstrede som følge af den stigende bilisme i mellemkrigstiden og indførelsen af en statslig bilafgift blev øremærket til forskning i veje. Laboratoriet for Vej- og Jernbanebygning udførte bl.a. forsøg til afdækning af de forskellige vejmaterialers slidstyrke, bæreevne og vedligeholdelsesbehov samt den mest optimale udformning af vejenes underbund. Cementbeton vandt ikke større indpas som vejbelægning i Danmark i modsætning til asfalt.

Symbiose

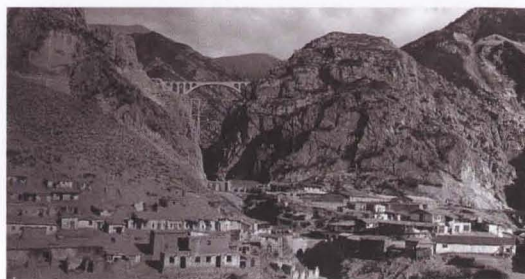
Christian Nøkkenved overtog i 1932 professoratet efter Ostenfeld og tilførte forskningen i bærende konstruktioner ved B-retningen nye perspektiver. Nøkkenved kom fra en stilling hos Christiani & Nielsen og havde i 1924 erhvervet den tekniske doktorgrad på en nu klassisk afhandling om pæleværkers rationelle beregning ¹¹. Han dimensionerede endvidere i 1927 de mere end 100 meter høje gittermaster i stål, der så at sige bar Kalundborg mellembølgeradio. Ved Den Polytekniske Lærestalt forskede Nøkkenved især i vindbelastningen på bygninger i samarbejde med en af dansk vindmølleindustriens historiske figurer, gasværksingeniør J. Irminger. Nøkkenved skrev derudover artikler om beregning af højspændingsmaster og -ledninger, der var et voksende og vindudsat område af den danske infrastruktur. Til forsøgsarbejdet konstruerede Nøkkenved Danmarks første egentlige vindtunnel.

I begyndelsen af 1930'erne flyttede en del af fagene ved B-retningen fra oprindelige lokaler ved Sølvtorvet og over i Den Polytekniske Lærestalts nyopførte bygningskompleks ved Øster Voldgade. Lærestalten ændrede i samme periode navn til Danmarks Tekniske Højskole (1933).

Danske entreprenørselskaber havde tidligt rettet opmærksomheden mod udlandet givet den begrænsede størrelse af det danske hjemmemarked. Incitamentet til at opdyrke udlandet blev forstærket under lavkonjunkturen i 1930'erne. Eksempelvis byggede Christiani & Nielsen motorveje i Tyskland, datidens dybeste kajmur i forbindelse med

udvidelsen af havnen i Cherbourg i Normandiet og påbegyndte i 1937 anlægget af en verdens første rektangulære sænketunneller af præfabrikerede betonelementer under Maas-floden i Holland. M. Lassen-Nielsen ledede projekteringen og opfandt den banebrydende metode at sikre den endelige placering af de udlagte tunnelelementer ved hjælp af sandunderskylning.

Akkumuleringen af byggeteknisk viden i Danmark var hjulpet af, at professorerne ved bygningsretningen typisk drev egen kommerciel rådgivningsvirksomhed. Anker Engelund er et udpræget eksempel herpå. Hans teoretiske forskningsindsats var begrænset. Men som professor i bygningsstatik fra 1928 og ansvarlig for DSB's broafdeling projekterede Engelund flertallet af de iøjnefaldende danske landsdelsbroer, der blev opført i 1930'erne dels ud fra ønsket om nedsat transporttid for togtrafikken, en stigende bilisme, regionalpatriotisme dels ud fra beskæftigelsehensyn.



Udslagsgivende for danske bygningsingeniørers succes ikke mindst uden for kredsen af industrilandene var evnen til at fremkomme med utraditionelle løsninger på udfordrende opgaver. Den evne var resultatet af en uddannelse, hvor konsekvent indføring i matematik, kemi og andre fundamentale videnskabsdiscipliner gik forud for specialisering. Billedet gengiver den transiranske jernbanes opstigning i Elburzbjergene, som Kampsax medvirkede i byggeriet af i 1930'erne (Foto: Gengivet med tilladelse fra COWI A/S)

Krig og besættelse

Mod slutningen af 1930'erne indtrådte en begyndende videnskabeliggørelse af de bygningstekniske fagområder, hvor en deskriptiv-empirisk tradition endnu var herskende.

I 1936 blev faget materialelære under B-retningen indplaceret i et nyoprettet Laboratorium for Byggeteknik under ledelse af professor Nøkkenved. Borgerlig Husbygning fik samme år tildelt ekstra undervisningsstillinger og ændrede efterfølgende titel til Institut for Husbygning og Byplanlægning. Indtil da havde forelæsninger og øvelser fulgt en omarbejdet lærebog fra 1876.

I 1936 fremkom de store danske entreprenørvirksomheder med udførlige planer til et motorvejsnet i Danmark inklusive faste forbindelser over Storebælt og Øresund. Planerne kunne ikke realiseres under de givne omstændigheder, men førte dog til oprettelse af en geoteknisk afdeling under Laboratoriet for Havnebygning og Fundering såvel som et asfaltlaboratorium under Laboratoriet for Vej- og Jernbanebygning. Laboratoriet fik i lighed med Husbygning også fik tilføjet Byplanlægning til titlen, men undervisningen og forskningen inden for det nyttilkomne fagområde var dog rudimentær. Momentum lå hos Laboratoriet for Teknisk Hygiejne, der gennem kloakering og drikkevandsledninger havde en naturlig forbindelse til byplanlægning.

Professor Anker Engelund tiltrådte i 1941 posten som rektor for Danmarks Tekniske Højskole. På dette tidspunkt var bygningsingeniørerne stadigvæk dominerende på Danmarks Tekniske Højskole. Over halvdelen af de uddannede ingeniører fra Læreanstalten i perioden 1890-1939 var bygningsingeniører, men 2. Verdenskrig og den tyske besættelse af Danmark ramte imidlertid faggruppen hårdt. Armeringsjern og stål var importvarer og vigtige rustningsmaterialer, hvorfor det hjemlige anlægsbyggeri kørte på vågeblus. Opførelse af fæstningsbunkere og flyvepladser for den tyske besættelsesmagt kunne danske entreprenørvirksomheder realistisk set ikke undslå sig, idet arbejder for værnemagten var en forudsætning for samarbejdspolitikken. Der var under alle omstændigheder tale om simple opgaver af et alt i alt begrænset omfang. I en række tilfælde opsøgte danske entreprenører dog selv opgaver hos besættelsesmagten ¹².

At en af grundlæggeren af entreprenørselskabet Højgaard & Schultz, civilingeniør Knud Højgaard,

stod i spidsen for et forsøg på at overtale Kong Christian 10. til at erstatte det folkevalgte demokrati med et autoritært ekspertstyre gavnede næppe heller bygningsingeniørernes prestige ¹³.

I modsætning til bygge- og anlægssektoren var krigsårene ganske perspektivrige set fra en bygningsteknisk forskningsvinkel. Aage Bretting blev i 1940 udnævnt til professor i vandbygning ved Den Polytekniske Lærestalt. Han havde som rådgivende ingeniør medvirket ved anlæggelse af radiostationer i Grønland, det dansk-svenske jernbaneprojekt i Tyrkiet og konstruktionen af Maas-tunnelen ¹⁴. Teknisk Geologi blev samtidig udskilt som et selvstændigt institut med tilhørende professorat med henblik på systematisk forskning knyttet til fundering af bropiller, havnemoler etc. Finansieringen kom fra Akademiet for de Tekniske Videnskaber, der var en selvejende institution oprettet med det formål at bygge bro mellem forskning ved de højere læreanstalter og industrien. Sidst men ikke mindst pegede K. W. Johansens doktorafhandling Brudlinieteorier fra 1943 pegede fremad mod jernbetonens guldalder efter 2. Verdenskrig.

Lundtofte-sletten

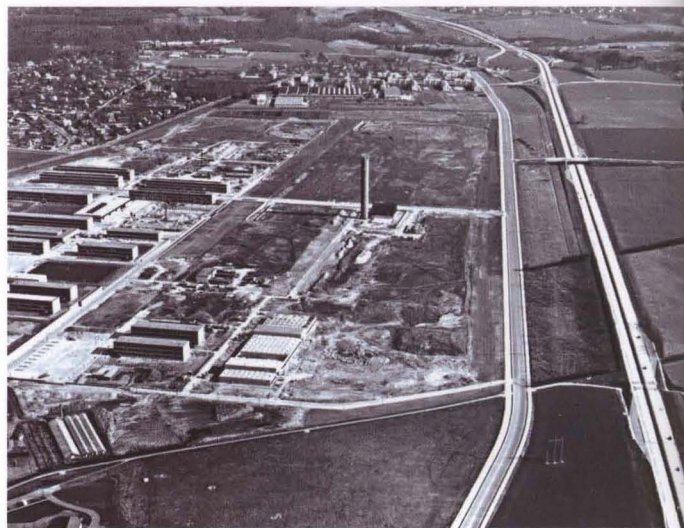
Ingeniørens anseelse i årene efter 2. Verdenskrig var høj, hvilket smittede af på søgningen til ingeniøruddannelserne. Forskningsmæssigt var en hovedudfordring at forholde sig til de fundamentale videnskabelige landvindinger, som krigsoprustningen havde afstedkommet.

Atombomben var det mest potente eksempel herpå, men også syntetisk gummi, fotometriske måleapparater til rimelige priser, og penicillin var resultatet af forskningsmiljøer og industri i tæt samspil.

I Danmark blev det Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd oprettet i 1946 for at give landets tekniske forskning et løft. Indførelsen af licentiatgraden, svarende til nutidens ph.d., styrkede tillige forskningen. Den første tekniske licentiatgrad på Danmarks Teknisk Højskole blev tildelt i 1955.

Tilgangen af ingeniører til erhvervsliv og offentlige myndigheder m.v. var truet på grund af de små pladsforhold på Danmarks Tekniske Højskole, hvilket førte til oprettelsen af Danmarks Ingeniørakademi i 1957. Studietiden for de såkaldte akademiingeniører, der blev uddannet her, var reduceret, og uddannelsen var praktisk orienteret.

I 1958 traf myndighederne yderligere beslutning om at udflytte både Danmarks Tekniske Højskole og Ingeniørakademiet til et nyopført bygningskompleks på Lundtofte-sletten ved Lyngby¹⁵. Byggeriet var planlagt til at vare 10 år. Grundstenen blev nedlagt i 1960, hvor det årlige optag blev skønnet til 480



Danmarks tekniske Universitet påbegyndte fra midten af 1960'erne udflytningen til et nyopført bygningskompleks på Lundtofte-sletten ved Kgs. Lyngby (Foto: www.past.dk).

civilingeniører og 250 akademiingeniører. De samlede anlægsudgifter var projekterede til en milliard kroner – et svimlende beløb i datiden. Et rejsegilde, hvor posten til forløren skildpadde m.v. beløb sig til op mod 60.000 kr. påkaldte sig kritik i dagspressen og hos Statsrevisorerne. Men i 1962 blev den samlede anlægssum for Lundtoftebyggeriet halveret primært gennem besparelser på forskningsområdet. Opførelsen af en forskerpark i Hørsholm kompenserede delvist herfor.

Bygningsingeniøruddannelsen flyttede som den sidste af hovedretningerne ud til Lundtofte-komplekset i 1970. Det byggetekniske fagområde omfattede da fem institutter for henholdsvis teknisk geologi, landmåling og fotogrammetri, strømningsmekanik og vandbygning, husbygning samt veje, trafik og byplanlægning. Hertil kom fire laboratorier for henholdsvis teknisk hygiejne, bygningsmaterialer, fundering samt varmeisolering. Afdelingen for Bærende Konstruktioner tegnede ikke længere B-retningen, men rådede dog over fem af i alt 18 professorater.

Med oprettelsen af Aalborg Universitets Center i 1974 mistede Danmarks Tekniske Højskole sit uddannelsesmonopol. Ungdomsoprøret, forsknings-

faglige stridsspørgsmål og organisatoriske konflikter prægede i to årtier på godt og ondt dagligdagen på Højskolen. Efter 1992 faldt søgningen til civilingeniøruddannelsen på få år med mere end 50 procent, hvilke udløste reduktioner i de i forvejen beskårede bevillinger. En ny studiestruktur blev indført, der resulterede i større mulighed for at kombinere fag på tværs af fagretninger og højnede den internationale profil. Graden af ekstern finansiering af forskningen steg samtidig til mere end 50 procent. Bygningsfagene blev, i lighed med andre fagområder, omorganiseret i kølvandet på at Danmarks Tekniske Højskole blev til Danmarks Tekniske Universitet i 1994, DTU-loven i 2000 og senest universitetsloven i 2003. I denne forbindelse blev BYG-DTU et af 11 institutter og samlede de fleste bygningsingeniørfag.

Laboratoriet for Varmeisolering

Opvarmning og ventilation i bygninger m.m. var per tradition maskiningeniørernes domæne. Under indtryk af forsyningssituationen udkastede professor i opvarmning og ventilation, Frits Christian Becker, under 2. Verdenskrig en plan til et lavenergihus, hvor en vindmølle skulle levere strøm til elvarme og varmt forbrugsvand.

Et voksende energiforbrug udgjorde et forsyningssproblem i 1950'erne, idet Danmark var afhængig af importeret kul og olie. De stigende priser på fossile brændselsstoffer belastede ydermere den notorisk svage danske betalingsbalance. Rumopvarmning beslaglagde op mod halvdelen af det samlede energiforbrug, men i den danske befolkning var stemningen ikke for en tilbagevenden til besættelsestidens restriktioner på varme- og energiforbruget. På den baggrund efterstod en klassisk ingeniøropgave: at muliggøre et øget forbrug gennem øget effektivitet. Bygning af kombinerede kraft-varmeværker var løsningen på forsyningssiden. På efterspørgselssiden var problemet, at huse og bygninger i Danmark sædvanligvis blev opført uisolerede, men hulmurede med et luftfyldt rum mellem yder- og indervæg.

Docent i opvarmning og ventilation, Vagn Korsgaard, genoptog Beckers forskning i kølvandet på Suez-krisen i 1956 og byggede med inddragelse af

Rockwool-koncernen m.fl. et forsøgshus på taget af Øster Voldgade-komplekset. Hensigten var at påvise, at det var muligt at skabe et tilfredsstillende indeklima i et ekstraisoleret lufttæt hus med anvendelse af passende varme- og reguleringsanlæg. Korsgaard testede bl.a., hvorvidt indblæsning af forskellige typer af isoleringsmaterialer på markedet forårsagede fugtproblemer¹⁶. I 1958 byggede laboratoriet tre identiske forsøgshuse til almindelig beboelse i Virum. Målt i forhold til det uisolerede hus viste det sig muligt at nedbringe varmeforbruget til 43 procent i det bedst isolerede, hvilket cementerede hulmursisolering som standard i Danmark og en række andre lande. Teknikken var på det nærmeste genial, idet den kunne anvendes ubesværet både i forbindelse med nybyggeri og ved eksisterende bygninger uanset størrelse. I 1959 blev Laboratoriet for Varmeisolering oprettet i tilknytning til bygningsretningen og med Korsgaard som professor fra 1965.

Man on the Moon - lavenergihus på jorden

Højkonjunkturerne i 1960'erne og faldende oliepriser dæmpede den politiske interesse for varmeisolering, men bevillinger til området blev opretholdt. Med udbredelsen af glasfacader og ovenlysvinduer i byggeriet rettede forskningen sig i stigende omfang mod problemet overopvarmning.

Amerikanerne satte i 1969 det første menneske på månen som et teknologisk PR-stunt afledt af supermagtsrivaliseringen. Inspireret heraf fremsatte Korsgaard offentligt den provokerende påstand, at den eksisterende teknologi tillod at højne ambitionerne og konstruere et såkaldt nul-energihus på ca. 120 kvadratmeter. Byggeomkostninger ville overstige den opnåede energibesparelse ved de gældende brændselspriser, men ikke i afskrækkende grad. Fra et ingeniørvenskabeligt synspunkt var det vigtigt at få fokus i energidebatten flyttet fra forsyningskilderne og tilbage til effektiviteten samt at inddrage vedvarende energikilder. Sårbarheden i den danske energiforsyning blev åbenlys under den første oliekrise i 1973.

Laboratoriet for Varmeisolering opførte to år senere i fællesskab med Institut for Husbygning og

Laboratoriet for Varme- og Klimateknik under M-retningen et nul-energihus udstyret med solfangere, der var en ny teknologi i Danmark. Mængden af indkøbt energi var beregnet til kun at skulle dække normal husholdning samt drift af pumper og ventilatorer. Projektet influerede kraftigt på Folketingets energiforskningsprogram fra 1976, der som satsningsområder bl.a. havde lavenergi huse, solvarme og varmelagring. Med øgede bevillinger steg personalet ved Laboratoriet for Varmeisolering fra 10 i 1973 til 55 i 1978.

Laboratoriet opførte i samarbejde med private byggefirmaer seks prototyper på lavenergi huse i standardudførelse i Hjortekær med et behov for købt energi til rumopvarmning og varmt vand pr år på mindre end 5.000 kWh, svarende til mindre end 1/4 af normalforbruget.



Forskningen i energibesparelser ved Danmarks Tekniske Højskole var førende i Europa op gennem 1970'erne under påvirkning af oliekriser og galoperende årlige betalingsbalanceunderskud. Særligt solgte budskabet om nul-energi huset, som det danske og svenske regentpar gæstede under et officielt statsbesøg i 1979. (Foto: www.past.dk)

Nye og dog velkendte problemstillinger

Stagnation i byggeriet oven på oliekriserne hæmmede udbredelsen af energieffektive byggeformer. De hidtidige energibesparelser, udnyttelsen af de danske olieletter i Nordsøen og naturgasnettets etablering bevirkede, at energipolitikken på ny blev fokuseret på

energiforsyningen. Nye energistandarder for byggeriet svarende til lavenergi huse blev således ikke indført i Bygningsreglementet. Men forskningsbevillingerne til Laboratoriet for Varmeisolering forblev uændrede. Brundtland-rapportens påpegede i 1987 forbindelsen mellem afbrændingen af fossile brændstoffer og drivhuseffekten, hvilket gav miljøspørgsmålet fornyet relevans for energiforskningen. Forskningen i energibesparelser i bygninger ved Laboratoriet for Varmeisolering blev i højere grad end tidligere relateret til det globale miljø. Der foregik endvidere et tæt samarbejde med professor Povl Ole Fanger på M-retningen, der havde gjort indeklima til et forskningsfelt i verdensklasse.

I 1996 fusionerede laboratoriet med Energigruppen fra Fysisk Institut og Institut for Husbygning til Institut for Bygninger og Energi, der i 2001 indgik i det nye institut BYG-DTU. Forskningen og undervisningen i hygrotermisk bygningsfysik, lavenergi bygninger samt solvarme blev ført videre i et styrket samarbejde med erhvervslivet.

Dansk energipolitik var på vågeblus efter årtusindeskiftet, men fik tilført dynamik, da EU i 2004 vedtog et vidtrækkende direktiv for nedbringelse af det samlede energiforbrug i medlemslandene med de nationale bygningsreglementer som løftestang. Der var udsigt til at nedbringe energiforbruget i et typisk parcelhus til 5.000 kWh i 2020 eller det samme som i forsøgshusene i Hjortekær fra 1979. Fra et forskningssynspunkt var der fornuft i at bidrage til lovgivningsprocessen for derved at fremme omstillingen af den danske byggebranche fra et erfarings- og anvisningsbaseret erhverv til et viden og forskningsbaseret erhverv ¹⁷.

Arktisk teknologi

Den energitekniske forskning ved bygningsretningen under DTU grænser op til en række discipliner i og uden for faget. Et eksempel herpå er Center for Arktisk Teknologi ARTEK, der blev oprettet i 2000 af DTU i fællesskab med bygge- og anlægsskolen i Sisimiut repræsenteret ved det grønlandske hjemmestyre. De tekniske løsninger, der virker og holder i Danmark, kan ikke blot overføres til Grønland, hvilket

skabte behov for en specialiseret bygningsingeniøruddannelse rettet mod de arktiske egne generelt. Leder og initiativtager til centret var professor Arne Villumsen¹⁸. Han kom fra Institut for Geologi og Geoteknik, der i 2000 blev opslugt af instituttet Miljø & Ressourcer.

I ARTEK-sammenhæng bidrog Villum Kann Rasmussen Fonden og A. P. Møller Fonden finansielt til opførelsen af et lavenergi-forsøgshus ved Sisimiut. Grønland mangler også ingeniører til efterforskning

og udvinding af råstoffer, spildevandsrensning, affaldshåndtering osv. Udnyttelse af vandkraft og andre vedvarende energikilder er en yderligere prioritet hos Hjemmestyret¹⁹.

Forsøgsvis er der på et dansk teglværk fremstillet mursten med en særegen varm rød farvenuance af grønlandsk ler. Leca-sten delvist fremstillet af affald fra de grønlandske fiskefabrikker er et andet praktisk resultat.



Lavenergihuset ved Sisimiut (Foto: Peter Clausen, gengivet med tilladelse fra Dynamo).

Laboratoriet for Landmåling

Obligatorisk undervisning i landmåling blev indført ved Den Polytekniske Lærestalt i 1857. Faget blev betragtet som et redskabsfag uden væsentlig forskningstilknytning, hvorfor nye metoder til kortlægning ikke blev medtaget i undervisningen. Dette gjaldt bl.a. fotogrammetri – kortlægning på grundlag af fotografier taget fra jorden eller fra fly, sammenholdt med terrestriske opmålte fixpunkter - der især efter 2. Verdenskrig vandt stor udbredelse i vores nabolande. Det spillede også ind, at Geodætisk Institut havde dårlige erfaringer med brug af fotogrammetri

under vanskelige forhold i Østgrønland i 1930erne. Derudover var den herskende opfattelse på Danmarks Tekniske Højskole, at Danmark havde et af verdens bedste kortværker.

Fotogrammetri og elektromagnetisk afstandsmåling

I begyndelsen af 1960erne skabte den økonomiske udvikling i Danmark behov for nye motorveje og nye bebyggelser. Traditionel landmåling var utilstrækkelig til at frembringe det nødvendige kortgrundlag for projekteringen heraf, hvilket skabte et marked for private fotogrammetriske firmaer. Først på dette tidspunkt begyndte man at undervise i fotogrammetri på Danmarks Tekniske Højskole,

Det teoretiske grundlag for landmåling er geometri og statistisk udjævning. Geometrien benyttes, når længde- og vinkelmåling skal omsættes til koordinater på et kort, og den statistiske udjævning benyttes til at opdage og fjerne grove fejl samt til at reducere uundgåelige målefejl ved at opstille og løse lineære ligninger efter mindste kvadraters metode. Elektronisk databehandling, især bygningen af Geodætisk Instituts Elektron Regnemaskine GIER i 1960, øgede drastisk mulighederne for at løse store ligningssystemer i dansk sammenhæng. Herunder at udføre komplicerede fotogrammetriske beregninger og opbygge numeriske modeller af terrænoverflader, de såkaldte digitale terrænmodeller.

I 1969 blev Ole Jacobi udnævnt til professor i landmåling ved Danmarks Tekniske Højskole parallelt med, at fotogrammetri blev undervisningsfag og forskningsområde. Laboratoriet for Landmåling skiftede navn til Institut for Landmåling og Fotogrammetri og fik i forbindelse med udflytningen til Lundtofte til huse på Landmålervej sammen med landmålerstationen i Hjortekær ²⁰.

Klaus Thiesen og Allan Dresling arbejdede med indførelse af den elektromagnetiske afstandsmåling, hvor man måler en afstand mellem to punkter ved at måle den tid, det tager for en lysbølge at bevæge fra det ene punkt til det andet og tilbage igen. Metoden medførte lettere og mere præcis opmåling og afsætning af punkter.

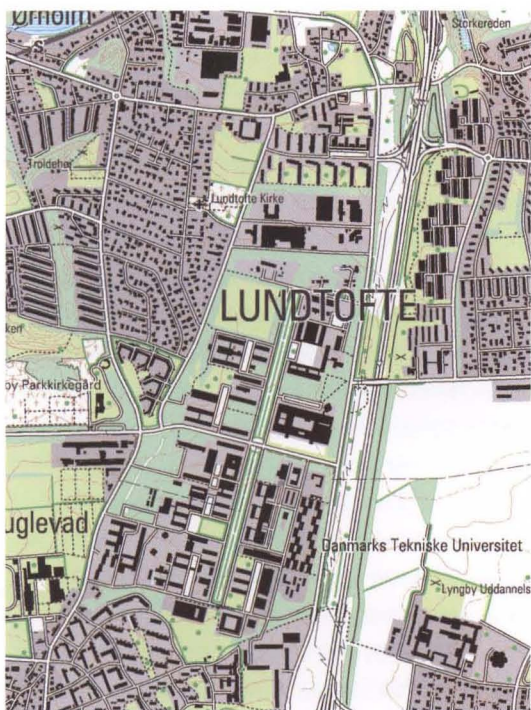
Keld Dueholm etablerede et samarbejde med Grønlands Geologiske Undersøgelser om udvikling af fotogrammetriske metoder til geologisk kortlægning i Grønland baseret på billeder taget med håndholdte småbilledkameraer fra helikopter eller fly. Herved kunne de svært tilgængelige fjeldskrænter med den interessante geologi opmåles ²¹.

Der blev udført en række specielle fotogrammetriske opgaver med medvirken af Ole Mærsk-Møller og Ole Jacobi, f.eks. tredimensionel registrering af en vandpartikels bevægelse hen over en bund i samarbejde med Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning. De fotogrammetriske kameraer blev opstillet uden for forsøgstanken. Lysstrålens passage fra partiklen gennem vandet, tankens glasvæg og luften hen til kameraet - eller rettere brydning i grænselaget mellem vand og glas og mellem glas og luft - blev beskrevet med en matematisk model. Det bevægelige punkt blev indmålt i tre dimensioner med 1/10 millimeters nøjagtighed. Et andet eksempel på en særlig fotogrammetrisk opgave fremkom i forbindelse med redningsbåden RF2, som sank ud for Hirtshals i 1981 med tab af seks besætningsmedlemmer. Værftet havde inden ibrugtagningen foretaget og filmet en stabilitetsundersøgelse, hvor en kran trak båden hele vejen rundt i vandet som en kajak, der vender. Jørgen Risager og Ole Jacobi påtog sig opgaven at beregne bådens rotationsvinkel for hvert af amatørsmalfilmens billeder. Institut for Landmåling og Fotogrammetri anvendte fotogrammetri til for Nationalmuseet at identificere de vragele, der siden er udstillet på Vikingskibsmuseet i Roskilde. Et andet utraditionelt projekt gjaldt samarbejdet med Institut for Odontologisk Videreuddannelse ved Københavns Tandlægehøjskole om registrering af hævelser efter tandudtræk.

Digitale kort og GPS

Institut for Landmåling og Fotogrammetri udarbejdede i midten af 1980erne den første digitale terrænmodel af Danmark i et samarbejde med Geodætisk Institut repræsenteret ved Poul Frederiksen, Else Mærsk-Møller og Ole Mærsk-Møller. Etableringen af mobiltelefoni herhjemme skabte

et behov hos telestyrelsen for en sådan model som grundlag for placeringen af de enkelte master i sendenet. Indførelsen af naturgas i Danmark på samme tidspunkt forudsatte kortlægning af et vidtforgrent rørnet. De fem naturgasselskaber besluttede at anvende digitale kort og de tilhørende Geografiske Informations Systemer (GIS). Private fotogrammetriske



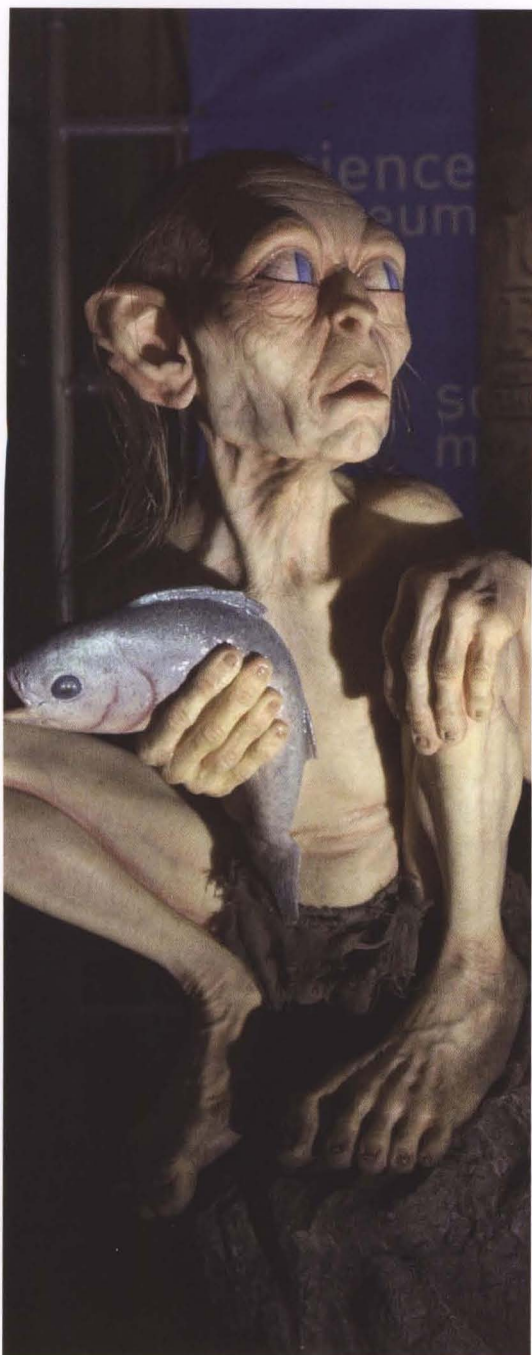
Den første digitale terrænmodel af Danmark blev udarbejdet af Institut for Landmåling og Fotogrammetri i samarbejde med Geodætisk Institut i midten af 1980'erne. Siden da er Geografiske Informations Systemer (GIS) blevet hverdag. Her ses et GIS kort over DTU området. (Foto: Gengivet med tilladelse fra Kort & Matrikelstyrelsen.)

firmaer fik lovning på kortlægningsopgaven, hvis de overgik fra analoge papirkort til digitale kortdatabaser. Digitale kort rummer den fordel, at administrative, tekniske og miljømæssige informationer kan knyttes til kortets enkelte objekter.

Eftersom naturgasselskaberne benyttede samme tekniske kort som kommunerne, blev resultatet, at samtlige Danmarks tekniske kort på få år forelå i en digitaliseret udgave. Kort og Matrikelstyrelsen digitaliserede efterfølgende de topografiske kort. Instituttet for Landmåling og Fotogrammetri samarbejde i de år med de fotogrammetriske firmaer bl.a. omkring udviklingen af det første danske Geografiske Informations System, DANGRAF. Fra 1990'erne blev det satellitbaserede amerikanske navigationssystem Global Positioning System, GPS, tilgængeligt for civil brug. Med GPS er det muligt at måle mellem to punkter, selvom der ikke foreligger frit sigt mellem punkterne. Desuden er nøjagtigheden, specielt over store afstande, meget bedre end de klassiske landmålingsmetoder. Til teknisk brug måler man tre koordinater (plan og højde) til et punkt med omkring halvdelen centimeters nøjagtighed i alle tre koordinater. Fra europæisk side planlagde man et fælles satellitnavigationssystem Galileo som supplement til det amerikanske GPS. I forbindelse med ændring af DTU's institutstruktur i 1996 blev Institut for Landmåling og Fotogrammetri lagt ind under det nye Institut for Planlægning, og i 2001 kom faggruppen Landmåling og Fotogrammetri ind under Informatik og Matematisk Modellering som faggruppen geoinformatik. Keld Dueholm og Anna B.O. Jensen tog i den nye sammenhæng undervisning og forskning i GPS op i DTU-sammenhæng.

Fra teknisk tegning til grafisk kommunikation

Det første egentlig bygnings tekniske fag ved den Polytekniske Læreanstalt, teknisk tegning, fik for alvor vind i sejlene ved visualiseringen af tredimensionale objekter. Faget var obligatorisk langt ind i 1970'erne, men mistede prestige ved fremkomsten af Computer Aided Design, CAD, i 1980'erne. Teknisk tegning blev formelt lagt ind under B-retningen som Institut for Grafisk Kommunikation, som senere



En model af Gollum. Ved Institut for Planlægning videreudviklede Henrik Wann Jensen i samarbejde Niels Jørgen Nielsen og ph.d.-studerende Jeppe Revall Frisvad sin simuleringsmodel til realistisk at kunne gengive genskin fra hud. Fænomenet var medicinsk velbeskrevet, men yderst kompliceret at modellere. Wann Jensen flyttede i 2001 til USA og modtog i 2006 en Oscar-pris i kategorien Academy Technical Achievement Award for sit bidrag til den skræmmende livagtige animering af figuren Gollum i sidste del af filmtrilogien Ringenes Herre. (Foto: Yui Mok, PA PHOTOS, gengivet med tilladelse fra POLFOTO)

indgik i Institut for Planlægning. Omdrejningspunktet for forskning ved Institut for Grafisk Kommunikation var naturtro computergrafik.

En ung studerende ved instituttet, Henrik Wann Jensen, tog i første halvdel af 1990'erne den numeriske modellering af lys op til behandling under vejledning af lektor Niels Jørgen Christensen. I 1996 fik Wann Jensen tildelt Ph.D.-graden for en banebrydende simuleringsmodel. Denne inddrog ikke blot de fysiske love for lysets udbredelse og brydning, men tillige de gengivne objekters stofopbygning, som er afgørende med hensyn til transparente materials absorption og refleksion af lys.

Da Institut for Planlægning i 2001 blev overflyttet til Center for Trafik og Transport, var det uden aktiviteterne inden for grafisk kommunikation. Disse overgik til Informatik og Matematisk Modellering under Elektrotekningen. Forskere fra det tidligere Institut for Grafisk Kommunikation med lektor Flemming Vestergaard i spidsen deltog som ekspertkonsulenter i forbindelse med projektet Det Digitale Byggeri 2003 - 2006, der indgik i regeringens konkurrencepakke *Vækst med vilje*.

Arbejdet blev videreført gennem Implementeringsnetværket for Det Digitale Byggeri i 2006, der blandt andet førte til etablering af et Building Information Model (BIM)-eksperimentarium ved BYG•DTU i 2007, der har til formål at skabe digitale kortmodeller for et givet byggeri som kan udveksles i hele dets livscyklus med henblik på effektivisering, minimering af konstruktionsfejl og i sidste instans forbedre sikkerheden af de færdige bygninger og anlæg.

Landtransport

Ved afslutningen på 2. Verdenskrig stod det klart, at en udbygning og modernisering af det danske vej- og jernbanenet var nødvendig. DSB udskiftede bestanden af damplokomotiver med kraftigere og mindre mandskabs- og vedligeholdelseskrævende dieselelektriske lokomotiver. En udvidelse af skinnenettet var ikke planlagt. Derimod blev planerne fra mellemkrigstiden angående en udbygning af det danske vejnet og herunder etablering af motorveje genoptaget ²².

H. H. Ravn og P. H. Bendsen blev udnævnt til professorer ved Laboratoriet for Vej- og Jernbanebygning samt Byplanlægning under Danmarks Tekniske Højskole i 1949, hvor A. R. Christensen og C. Q. Bay gik på pension. Bendsen fik ansvaret for jernbanebygning samt som nebengeschæft byplanlægning, mens Ravn overtog vejbygningen. Forskningen ved laboratoriet blev som før krigen koncentreret om dels geotekniske undersøgelser i felten af vejbefæstelsers bæreevne, vejteallinger o.l., og dels fysisk-kemiske laboratorieundersøgelser af jernbaneskiner, forskellige asfalttypers egenskaber osv.

Forskning vedrørende vejbelægnings ruhed eller friktionsegenskaber hørte under det statslige Dansk Vejlaboratorium, der havde langt lettere ved at opnå bevillinger til personale og udstyr end Laboratoriet for Vej- og Jernbanebygning samt Byplanlægning. Meget praktisk ledede professor Ravn fra 1949 også dette laboratorium. Asfaltindustrien indgik tillige i det nationale vejtekniske forskningssamarbejde. Vejnettets udbygning krævede rationel prioritering, idet opgavens omfang og ikke mindst lokale ønsker oversteg de afsatte ressourcer.

Professor Bendtsen udgav lærebøgerne *Moderne Jernbanestationer og Jernbanespor* i henholdsvis 1950 og 1953, men i erkendelse af den begrænsede efterspørgsel efter jernbanebygning orienterede Bendsen efterfølgende sin forskning mod byplanlægning og skrev de første systematiske lærebøger på dansk om emnet.

Trafikteknik

I 1955 påbegyndte Laboratoriet for Vej- og Jernbanebygning samt Byplanlægning et samarbejde med Kunstakademiet inden for byplanlægning. Samarbejdet blev kortvarigt. Arkitekternes så at sige visuelle indgangsvinkel til byplanlægningen kolliderede med civilingeniørernes fokusering på den tekniske infrastruktur. Fælles for de to faggrupper var dog som i udlandet målsætningen om den funktionsopdelte by med fabrikker for sig og boliger for sig.

I lyset af udflytningen af boliger og arbejdspladser til de nye forstæder blev byplanlægning ved laboratoriet defineret som trafikteknik og trafikplanlægning ²³.

Inspirationskilden var USA og Traffic Engineering, der havde biltransport som genstandsfelt. Intentionen var opstilling af numeriske vejtekniske modeller for f.eks. trafikens fordeling på trafikmidler i et lokalområde. I 1961 udgav Bendtsen den første danske lærebog i Traffic Engineering, *Town and Traffic in the Motor Age*. Bendtsen fik afgørende indflydelse på implementeringen af moderne, mere rationelle, redskaber til trafikplanlægning i Storkøbenhavn og opnåede international anerkendelse.

Den stærkt øgede trafikintensitet og tungere lastvogne medførte et øget slid på vejnettene omkring de større danske byer, som der ikke var taget højde for ved dimensioneringen, og i sidste instans træthedsskader i befæstelsen. Saltning forlænger den tid, vejene holdes våde, og kan medvirke til nedbrydning af vejbefæstelser. Ravn tog på den baggrund tøbrudsskader på veje og forebyggelse heraf op til rationel behandling ²⁴.

Specialestuderende ved Laboratoriet for Vej- og Jernbanebygning samt Byplanlægning bidrog i 1964 - 65 på foranledning af Statens Vejlaboratorium (tidligere Dansk Vejlaboratorium) til konstruktionen af et transportabelt og let betjent forsøgsapparat til udførelse af bæreevнемålinger. Elektronisk stødregistrering sikrede en hidtil uset realisme ved simulering af belastningen fra et hurtigt kørende bilhjul på en vejoverflade ²⁵.

I 1965 skiftede laboratoriet titel til Laboratoriet for Vejbygning samt Trafikteknik og Byplanlægning. Forskningen ved laboratoriet rettede sig i stigende grad mod modellering af og prognoser for bytrafik og herunder "kapacitetsberegninger på fri gadestrækning og i lyskryds bl.a. ved hjælp af simulation af færdslen på elektronregnemaskine." ²⁶

Fokusskifte

Bent Thagesen overtog Ravns professoratet i vejbygning i 1974. Førstnævnte havde beskæftiget sig med vejbygning i udviklingslande for bl.a. Kampsax. Erik Kaufmann besatte et nyoprettet byplanprofessorat ved Institut for Vejbygning samt Trafikteknik og Byplanlægning, hvorefter Bendtsens professorat var begrænset til trafikteknik. Kaufmann var en anerk-

endtl statslig byplanlægger og derudover forfatter til flere børnebøger samt stemmen bag børneradios populære figur Onkel Erik.

Forskningen i vejbygning, og i mindre omfang trafikteknik og byplanlægning ved B-retningen, var afhængig af omfanget af det offentlige vejbyggeri. Dette blev et problem, efter at Folketinget vedtog et offentligt bygge- og anlægsstop på foranledning af den første oliekrise i 1973.

Den alt mere udbredte adgang til computerberegninger gav endvidere fagområder uden for bygningsingeniørvidenskaben adgang til det attraktive marked for trafikforskning. Ved Danmarks Tekniske Højskole var Institut for Matematisk Statistik og Operationsanalyse (IMSOR) særdeles aktive inden for numerisk modellering af kollektive trafikløsninger. Under påvirkning af ungdomsoprøret blev der indført større valgfrihed i studierne ved ingeniøruddannelsen efter udflytningen til Lundtofte, hvorefter elementær vejbygning og trafikteknik ikke længere var et obligatorisk fag ved bygningsretningen.

I 1977 gik Axel O. Bohn, der havde varetaget al asfaltforskningen ved Danmarks Tekniske Højskole siden 1939, på pension, og Bendtsen ligeså. Forskningsleder for Rådet for Trafiksikkerhedsforskning N. O. Jørgensen tiltrådte det ledige trafikprofessorat ved det navneforandrede Institut for Veje, Trafik og Byplan.

Folketinget vedtog i 1977 en råstoflov, der skulle sikre ressourceøkonomisk anvendelse af bl.a. sand og sten fra den danske undergrund. Foranlediget af den øgede ressource- og miljøbevidsthed samt behovet for veje i udviklingslandene blev et indsatsområde for forskningen ved instituttet frembringelse af et realistisk matematisk-teoretisk grundlag for dimensionering af befæstelser med et indhold af ikke-konventionelle vejbygningsmaterialer samt udvikling af erfaringsgrundlag og teori til områder, hvor klima eller trafikbelastningen afveg fra de betingelser, som de gældende empiriske metoder var udviklet til ²⁷.

Forskere ved Institut for Veje, Trafik og Byplan konstruerede en belastningsvogn til fuldskala udmattelsesforsøg på vejbefæstelser udført i klimakammer under temperaturer varierende fra lave kulde- til høje

varmegrader. Også grundvandsspejlet kunne simuleres ²⁸. Arbejdet var delvist finansieret af Vejdirektoratet. Statens Vejlaboratorium under direktoratet deltog efterfølgende i stort set samtlige forskningsprojekter gennemført i vejprøveanlægget eller -maskinen. I tilknytning udviklede de involverede forskere prototyper på en række måleinstrumenter, der siden fandt anvendelse ved udenlandske forskningsinstitutioner.

Nærdemokrati, byøkologi og komplekse teknologiske bysystemer

Forskningen i byplanlægning ved Institut for Veje, Trafik og Byplan var som trafikteknikken op gennem 1970'erne udsat for et ydre pres på grund af det beskudte nybyggeri, miljøfaktoren og konkurrerende fagdiscipliner. I industrilandene orienterede forskningen i byplanlægning sig i stigende grad mod levevilkår og nærdemokrati. I Danmark var borgernes krav på deltagelse indskrevet i Lands- og Regionplanloven fra 1973 og Kommuneplanloven fra 1975. Ved Institut for Veje, Trafik og Byplan tog forskere det sociale liv eller rettere manglen på samme i de storkøbenhavnske forstæder op til særskilt behandling.

Kaufmann trak sig tilbage som professor i byplanlægning i 1979. Afløseren, Stefan Ott, var tidligere stadsarkitekt i Malmø. Under 1980'ernes økonomiske krise iværksatte lokale myndigheder i kriseramte storbyer i de vestlige lande sanerings- og byfornyelsesprojekter for at fastholde befolknings- og dermed skattegrundlaget. Godt hjulpet på vej af de mange kommunale beskæftigelsesprojekter blev byplanlægningens forskningsområde redefineret fra borgerdeltagelse til byøkologi. Den funktionsopdelte storby var ikke længere ambitionen, men derimod det kompakte, integrerede og mangfoldige byrum.

Set fra en ingeniørfaglig vinkel var det problematisk, at decentrale tekniske løsninger på samfundsopgaver, såsom spildevandsrensning, typisk indebar forøgede ressource- og miljøomkostninger. Morten Elle fra byplanlægningsgruppen fik afgørende betydning for, at EU-kommissionen i begyndelsen af 1990'erne igangsatte *The European Awareness*



Byfornyelse på Sønder Boulevard, Vesterbro, København. Under 1980ernes økonomiske krise gennemførtes store byfornyelsesprojekter for at fastholde befolknings- og dermed skattegrundlaget. (Foto: Karsten Bidstrup, Gengivet med tilladelse fra POLFOTO)

Scenario som led i Kommissionens overordnede innovationsprogram ²⁹. Målet var brugerdrevet bydesign.

I 1993 blev professoratet i byplanlægning ved Institut for Veje, Trafik og Byplan nedlagt da Stefan Ott trak sig tilbage på grund af sygdom. Efterfølgende formåede byplangruppen dog at fastholde den dynamiske profil og var med til at øge byplanlægningsfagets tiltrækningskraft markant i forhold til kvindelige studerende og forskere.

I 1994 skiftede Danmarks Tekniske Højskole navn til DTU og samme år vedtog Konsistorium en strate-

giplan med prioritering af 20 forskningsområder, hvor læreanstalten var eller havde potentialet til at blive blandt de førende internationalt set. Både trafik- og byplanlægning indgik i det strategiske fokusområde Planlægning og Teknologiledelse.

Transport

Per Ullidtz ledede forskningsindsatsen i vejbefæltelsers bæreevne ved Institut for Veje, Trafik og Byplan med baggrund i forsøg udført på vejprøveanlægget og blev, som vel den eneste danske vejforsker,

kendt i fagkredse over hele verden ³⁰. I 1995 udgav Steen Leleur fra Institut for Veje, Trafik og Byplan bogen *Road Infrastructure Planning: a decision-oriented approach*.

Servicesamfundets transportafhængighed og milliardudgifter til vedligeholdelse af det eksisterende og stærkt udbyggede vej- og skinnenet var en fordel for instituttet. Men de store, men langvarige forskningsprojekter gennemført i vejprøveanlægget sammen med Vejteknisk Institut (tidligere Statens Vejlaboratorium) ikke var særligt synlige. Trafikministeriet, Vejdirektoratet, Banestyrelsen, det daværende HT samt de store rådgivende ingeniørfirmaer havde endvidere gennem mange år efterlyst en større dansk forskningsindsats inden for trafikområdet.

I 1996 blev Institut for Veje, Trafik og Byplan lagt sammen med Institut for Anlægsteknik, Institut for Landmåling og Fotogrammetri og Institut for Grafisk Kommunikation til det nye Institut for Planlægning. Thagesens professorat i vejbygning blev ikke genbesat ved hans pensionering i 1998.

Året efter blev de vejbygnings- og trafiktekniske aktiviteter koncentreret ved det nyoprettede Center for Trafik og Transport (CTT) og byplangruppen formåede at udnytte opsvinget i nybyggeriet i anden halvdel af 1990'erne. Bæredygtig udvikling af byer med lokalt engagement blev fokus for forskningen ³¹. Der var tale om en orientering mod dynamiske processer, der dog kun delvist modsvarede ingeniørideal om naturvidenskabeligt baseret teknologiudvikling, Scientific Engineering. Den moderne storby blev opfattet som et komplekst, teknologisk system under stadig forandring. Men det var omsonst at søge at opstille en numerisk metamodel for den tekniske infrastruktur, givet graden af kompleksitet.

På den anden side gav tilgangen bygningsingeniørerne en veldefineret position inden for byplanlægning som garant for overblikket i forbindelse med implementering af bæredygtige teknologier og "oversætter" af tekniske analyse- og forsøgsresultater fra andre ingeniørdiscipliner ³². Et samarbejde mellem byplanlæggerne og Laboratoriet for Varmeisolering blev påbegyndt i det lys.

Spændbeton

Jernbetonens udbredelse fra 1900-tallets begyndelse gav i Danmark bygningsingeniørerne fodfæste inden for husbygningen, der hidtil havde været arkitekternes gebet. Grundlæggende indsigt i bygningsstatikkens love var en forudsætning for forsvarlig anvendelse af det nye materiale. Beton kan dårligt tage træk, og må derfor armeres. Samtidig virker traditionel armering først rigtigt, når betonen revner.

Efter 2. Verdenskrig blev betonens anvendelsesmuligheder udvidet ved fremkomsten af forspændingsteknikken. Denne bestod i at lade armeringen påføre betontværsnittet trykspændinger på de områder, hvor der i brugstilstandene ville opstå trækspændinger. Resultatet var komponenter med mindre konstruktionshøjde og egenvægt. Reducerede dimensioner var afgørende i forbindelse med konstruktioner med stor spændvidde og en forudsætning for standardiseret fabriksfremstilling af større betonelementer ³³. Spændbeton kan udføres enten som før-spændt, hvor armeringen forspændes, inden



den omstøbes med beton eller som efterspændt.

Ved efterspændt beton er armeringen lagt i kanal-
er i en hærdet konstruktion, og derefter spændt. Hvor
førspændt armering fortrinsvis anvendes som lige
liner, er det ved efterspænding muligt at føre armer-
ingen i en bølgeform, der mere naturligt optager
belastningen. Konstruktørerne fik derved en markant
øget frihedsgrad, men som et udpræget håndværk-
sprodukt er efterspændt beton et dyrere byggemate-
riale, der primært anvendes ved større konstruktioner
såsom siloer, tunneler, broer og prestigebyggeri som
skaller og kupler.

Efterspørgslen efter betonkonstruktioner i indust-
rielandene var nærmest umættelig efter 1945 pga.
manglen på boliger og behovet for en almen udbyg-
ning og i nogle tilfælde genopbygning af infrastruk-
turen. Afkoloniseringen skabte desuden nye nationer,
hvor magthavere støttet af de internationale hjælpeor-
ganisationer søgte at legitimere sig gennem udvikling i
form af anlæggelse af billige veje, broer m.v.

At lade murere bygge med mursten var dyrt ikke



blot i Danmark. Mindre løntung ikke faguddannet
arbejdskraft kunne derimod i nogle lande varetage
monteringen af betonelementer, der tillige var relativt
nem at mekanisere med brug af løftekraneer m.v. El-
ementbyggeriet kunne sikre en kvalitet ved at kompo-
nenterne blev fremstillet på en fabrik under optimale
forhold, og derved reduceredes problemerne bl.a. ved
at bygge om vinteren. Lovgivningen om statsstøtte til
boligbyggeri i Danmark støttede såvel elementbyggeri
som anvendelsen af indenlandske byggematerialer,
dvs. beton, cement og tegl.

Institut for Husbygning og Byplanlægning

I 1938 udgik der 76 bygningsingeniører fra Dan-
marks Tekniske Højskole mod 125 i 1950 ³⁴. Den
bygningstekniske undervisning foregik ved Labora-
toriet for Husbygning, mens forskningen i betonkon-
struktioner og dens anvendelse per tradition lå uden
for fagets domæne. Laboratoriet for Bygningsteknik,
ikke husbygning, leverede således bl.a. i 1954
eksperter til Dansk Ingeniørforenings Udvalg til
Rationalisering af Byggeriet.

Arne Jacobsen fik en afgørende ekstern betydning
for udviklingen af bygningsteknikken i 1950'erne.
Ved opførelsen af SAS-huset over for Københavns
Hovedbanegård introducerede han funktionsbaseret
bygningsprojektering, og banede dermed vejen for
udviklingen af elementbyggeriet, hvor generelle
komponenttyper kunne anvendes i flere forskellige
konstruktioner forudsat, at de givne tekniske mini-
mumskrav og specifikationer var opfyldt.

Undervisningen i byplanlægning ved Institut for
Husbygning og Byplanlægning blev udskilt i 1962
som led i en specialisering, der igen afspejlede den
danske pionerstilling inden for montagebyggeri ³⁵.
Institutledelsen ansatte i 1967 et større antal bygn-
gingsingeniører til at undervise og forske i industribyg-
geri. Ved bygningsretningens udflytning til Lundtofte
blev Husbygning tildelt to professorater. Det ene gik

*Pont de Schlayn 1948 - 49 over Meuse-floden i Belgien.
Broen er ved at blive efterspændt (Foto: www.past.dk).*



I 1982 udskrev præsident François Mitterrand en international arkitektkonkurrence om et kommunikationscenter, som samtidig kunne fungere som et arkitektonisk monument. Bygningsværket skulle knytte den nye bydel La Défense sammen med resten af Paris. Konkurrencen blev vundet af den danske arkitekt Johan Otto von Spreckelsen i samarbejde med civilingeniør, senere professor ved DTU, Erik Reitzel. Vartegnet fik navnet "La Grande Arche". Triumfbuen der er 111 meter høj, 107 meter bred og 112 meter dyb er et godt eksempel på foreningen af arkitektoniske og polytekniske dyder i Architectural Engineering. (Foto: Gengivet med tilladelse fra www.photoeverywhere.co.uk)

til cand. polyt. Johs. F. Munch-Petersen, der som rådgivende ingeniør havde medvirket ved rationaliseringen af dansk byggeri. Det andet professorat besatte arkitekt Knud Peter Harboe, der ligeledes havde praktiske erfaringer fra elementbyggeri.

Bæredygtigt byggeri

Det stagnerende bolig- og erhvervsbyggeriet under 1970ernes oliekrise havde en negativ afsmittende effekt på husbygningsfaget. På den anden side havde den hektiske byggeaktivitet i det forudgående årti ført til udbredt sjusk og fejlkonstruktioner. Udbedring

heraf og principperne for bæredygtigt byggeri i fremtiden blev i 1980erne centrale forskningsområder ved Institut for Husbygning. Byggeriet var fortsat styret af arkitekterne, hvis medieprofil og ambitionsniveau voksede støt. Arkitekternes idéforslag var ikke nødvendigvis i overensstemmelse med naturlovene. Afsøgning af holdbare tekniske kompromiser var således en yderligere opgave for den husbygningstekniske ekspertise.

Ved instituttet tog Kristian Hertz den udfordring op at skabe et grundlag for at udbrede de funktionsbaserede krav til også at omfatte brandsikkerheden

i bygninger, så de nye krav kunne implementeres i det danske bygningsreglement. Området var som det sidste stadig reguleret i henhold til erfaringsbaserede regler. Disse tog udgangspunkt i en standardbrand, som typisk var langt kraftigere end virkelighedens brande. Fraværet af realistiske brandkrav betød i visse tilfælde et sikkerhedsproblem, men hovedsageligt et overforbrug af materialer i størrelsesordenen milliarder kroner. Forskningsudfordringen var opstilling af formelle, rationelle teorier og numeriske modeller for hele brandforløbet, idet sammenstyrtningsfaren for de fleste konstruktioner er størst i afkølingsfasen. I et videre perspektiv fører funktionsbaserede brandkrav til konstruktiv frihed og kreativitet i byggesektoren, når man kan arbejde rationelt i stedet for at være bundet af snævre erfaringsbaserede regler.

Parallelt med defineringen af, hvad der i overført betydning var bæredygtige byggemetoder, medvirkede Institut for Husbygning til opstilling af retningslinjer for konstruktion af tilsvarende prisbillige, præfabrikerede standardelementer. Et eksempel herpå var de nu velkendte sandwich-elementer bestående af mineraluld placeret mellem to plader. Flere af instituttets ansatte implementerede forskningsresultater i konstruktionsopgaver i praksis og sikrede overensstemmelse mellem forskning og byggeriets behov. Eksempelvis udviklede Kristian Hertz konstruktioner til udenrigsministeriet i Saudi Arabien tegnet af den danske arkitekt Henning Larsen og Erik Reitzel konstruktionerne til von Spreckelsens triumfbue i Paris.

Nye materialer og konstruktioner

Nye aspekter kom til op gennem 1990erne. Stadig slankere konstruktioner som følge af forbedrede materialekvaliteter og mere nøjagtige beregningsmodeller mindskede samtidigt bygningskonstruktionernes modstandsevne over for brand. Billedet blev forværret af energikrisen, som betød større isoleringstykkelser, hvorved varmen fra brandene ikke kunne slippe væk, men bidrog til ødelæggelserne. Eksplosiv afskalning af beton bl.a. i en række tunneler kaldte på nye løsninger til de nye problemer, og bl.a. udvikledes en prøvningsmetode til vurdering af betonens

afskalningsegenskaber under brand ved DTU. Da et nyt bygningsreglement blev indført i Danmark i 2004 var det inklusivt funktionsbaserede brandkrav³⁶. Danmark var et foregangsland i så henseende. Den udvidede EU-lovgivning på byggeområdet satte generelt fokus på design af byggematerialer, som hidtil var udført mere eller mindre uafhængigt af selve byggeprocessen. Institut for Husbygningen øgede samarbejdet med Laboratoriet for Varmeisolering med hensyn til opstilling af et energiregnskab for en bygningens samlede fremstillingsproces. De to laboratorier blev formelt lagt sammen med Instituttet for Anlægsteknik, byplandelen af Instituttet for Veje, Trafik og Byplan og Energigruppen fra Fysisk Institut i 1996 til Institut for Bygninger og Energi. Ved dannelsen af BYG-DTU i 2001 kom Afdelingen for Bærende Konstruktioner og Materialer med, hvorved de fleste discipliner, der skal anvendes samtidigt i en bygningsprojektering blev samlet i et enkelt institut.

Sammensmeltningen af konstruktion i konventionel forstand og design gav i 2003 anledning til oprettelse af et professorat i Architectural Engineering. Stillingen blev besat med Erik Reitzel, som matematisk havde formuleret en fundamental sammenhæng mellem brudlinjer og minimalkonstruktioner, og rådgivet i forbindelse med opførelsen af bl.a. UNESCO's hovedkvarter i Paris.

Arkitekter uddannes i Danmark ved Kunstakademiet og ikke ved en polyteknisk læreanstalt som det ses i andre lande. At DTU introducerede Architectural Engineering herhjemme afspejlede et ønske om at skabe en uddannelse der kombinerer arkitektur og polyteknik. Dette kan på en måde ses som en tilbagevenden til ingeniørkunst.

Vandbygning

Sammen med bærende konstruktioner var vandbygning et af bygningsingeniørfagets historiske kerneområder. Vandbygning spændte bredt, men broer eller rettere brooverbygninger hørte dog ind under bygningsstatikken og kloakering m.v. under Teknisk Hygiejne.

Helge Lundgren blev i 1950 udnævnt til professor ved Laboratoriet for Havnebygning og Fundering ved



Danmarks Tekniske Højskole. I fortsættelse af professor J. Munch-Petersens arbejder jvf. kapitel 1 påbegyndte Lundgren anden fase i videnskabeliggørelsen af vandbygningsfaget herhjemme. Incitamentet kom dels fra et ophold ved Harvard University, der var ledende inden for moderne teori om mekaniske kræfter overført gennem jord. Hertil kom Folketingets beslutning i 1951 om at stoppe bygningen af en havn ved Hanstholm på det nok mest udsatte punkt på Vesterhavskysten. Byggestoppet hvilede imidlertid ikke på rationelle beregninger. Teoretisk dominerede den såkaldte tysker-hydraulik baseret på de almene naturlove for væsker og newtonske mekanik³⁷. Kysttekniske anlægskonstruktioner afveg imidlertid fra denne med hensyn til kompleksitet og bølgebelastningen. Lundgren var sandsynligvis den første i verden til at opstille en dybere rationel beskrivelse af bølgemønstret ved kysten og derigennem bølgenes

Helge Lundgren havde været ansat i Anker Engelunds private bro-rådgivningsfirma og hos Christani & Nielsen. Her forberedte Lundgren sin doktordisputats, en generel plastisk teori for tynde cylindriske skaller, som i begyndelsen af 1960'erne fandt anvendelse i forbindelse med konstruktionen af de særegne caissoner af jernbeton til ydermolen ved Hanstholm Havn. Som følge af de urolige vej- og bølgeforhold akkumulerede de involverede entreprenørselskaber E. Pihl & Søn, Wright, Thomsen & Kier samt Topsøe-Jensen & Schrøder en vigtig ballast af praktiske erfaringer (Foto: Gengivet med tilladelse fra E. Pihl & Søn)

kraftpåvirkning på konstruktioner såvel som af de bølgeinducerede strømme på langs af kysten og dermed sedimenttransporten.

Foranlediget af Lundgren blev Hanstholmprojektet genoptaget i 1955 og modelforsøg og teoretiske analyser af tilsandings- og bølgeproblemet blev iværksat³⁸. Han forhindrede ligeledes på basis af laboratorieforsøg og teoretiske beregninger en beslutning om lukning af Thyborøn-kanalen.

Hydrodynamik

I 1955 blev Laboratoriet for Havnebygning og Fundering opdelt i to. Lundgren fik overdraget ledelsen af Laboratoriet for Havnebygning. Professor J. Brinch Hansen tiltrådte som leder af Laboratoriet for Fundering såvel som af Geoteknisk Institut.

Jord opfører sig mestendels som et plastisk materiale i brud- eller skredstadiet, og Brinch Hansens doktordisputats *Earth Pressure Calculation* (København 1953) var et systematisk, videnskabeligt værktøj til beregning og dimensionering af bøjelige vægge i f.eks. havne- og kajanlæg, baseret på plasticitetsteorien.

Lundgrens ultimative målsætning for den kysttekniske forskning var Scientific Engineering forstået som opstilling af deterministiske modeller, der byggede på en afdækning af de mekaniske processer involveret helt ned på sandkorns- og vandmolekyleniveau. Til numerisk modellering af reaktioner og processer udnyttede Lundgren, at elektroniske regnemaskiner havde fået et gennembrud under 2. Verdenskrig. I samarbejde med Torben Sørensen udviklede Lundgren i 1957 verdens første pulserende vandtunnel med gennemsigtige sider til 1:1 undersøgelse af havbunden under kraftig bølgegang. Bevægelig-bund metoden blev endvidere forfinet, så det kun var nødvendigt at opbygge forsøgsopstillinger af ydremolerne for at kunne forudsige sedimenteringen og de aktuelle vandybder i et havneindløb.

Lundgren tog i 1964 initiativ til oprettelse af det selvstændige Vandbygningsinstitut finansieret af Akademiet for de Tekniske Videnskaber. Instituttet fik Lundgren og Brinch Hansen som direktører, og skulle drive forsøgs- og undersøgelsesvirksomhed og rådgive entreprenørselskaber m.m.

Teknisk geologi og teknisk hygiejne

Miljøspørgsmål forstået som negativ påvirkning af de ydre omgivelser spillede traditionelt en underordnet rolle i ingeniørvidenskaben. For bygningsingeniørerne var forsynings- og afledningssikkerheden fikspunktet. Økonomisk vækst og en øget befolkning medførte imidlertid et øget forbrug af basale ressourcer som rent drikkevand, sand og grus. Hertil kom et affalds-

og spildevandsproblem.

Lederen af borearkivet ved Danmarks Geologiske Undersøgelse, geologen Theodor Sorgenfrei, tiltrådte i begyndelsen af 1960'erne et professorat i faget teknisk geologi under bygningsretningen ved Danmarks Tekniske Højskole.

Faget teknisk hygiejne undergik i årtierne efter 2. Verdenskrig under professor Lundbyes ledelse en omorganisering i retning af det amerikanske Sanitary Engineering, der indbefattede mikrobiologiske aspekter. Lundbyes efterfølger som professor blev ganske sigende kemiingeniøren Karl Erik Jensen. At forskere ved B-retningen for alvor begyndte at beskæftige sig med vandkvaliteten i de danske farvande i anden halvdel af 1960'erne, skyldtes primært udledning af stadig større mængder varmt kølevand fra de regionale kraftværker. Indførte Danmark atomkraft, ville problematikken øges.

Planer om at bygge broer mellem Helsingør og Helsingborg og over Storebælt var en yderligere faktor³⁹. Bropillerne ville påvirke vandgennemstrømning og dermed saltindholdet i de indre danske farvande og Østersøen og i sidste instans fiskearternes udbredelsesmønstre. Poul Harremøes havde sammen med Frank Engelund - se nedenfor - udgivet undervisningshæftet *Elementær Bølgemekanik* og blev i 1969 knyttet til Laboratoriet for Teknisk Hygiejne, hvor han tog vandskiftet i de indre danske farvande op til rationel behandling. Harremøes påpegede, at beregninger af fortyndingen af spildevand m.v. måtte tage højde for den ringe dybde i de indre danske farvande, der begrænsede vandskiftet. Harremøes indrettede et forsøgsanlæg i et nedlagt renseanlæg ved Mølleåen. I 1972 blev han udnævnt til professor i miljøteknologi.

ISVA

I forbindelse med udflytning til Lundtofte, blev Laboratoriet for Havnebygning og Laboratoriet for Hydraulik lagt sammen til Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning (ISVA), der fik miljø i bred forstand som del af genstandsområdet. En amerikansk gæsteprofessor kick-startede forskning og undervisning i grundvand. Det eksisterende vandbygningsinstitut ændrede i 1971 navn til Dansk Hydraulisk Institut

(DHI) med intention om at skabe et internationalt ledende center for strømningsteknik. De to institutter var i en lang periode at opfatte som en helhed.

Bølger og strøms vekselvirkning på begrænsede vanddybder og deres belastning af tekniske konstruktioner rummede mange facetter og rejste en række fundamentale uafklarede spørgsmål. Professor ved ISVA Frank Engelund havde konstrueret havne i Grønland og specialiserede sig i sedimenttransport i floder med udpræget materialevandring. Forskerne ved ISVA inddrog bundens "ruhed" i den hydromekaniske modellering af transporten af enkeltkorn langs bunden og opslæmmet i vandmassen. Den matematiske model for sedimenttransporten i floder blev udvidet til at omfatte deltaer og lavvandede havområder, og DHI deltog som almenyttig forskningsinstitution bl.a. i kanalprojekter i Asien ⁴⁰.

Professor Michael B. Abbott blev knyttet til DHI som ekstern ekspertkonsulent i den nye fagdisciplin Computational Hydraulics ⁴¹. Lundgren beskrev den almene, mekaniske fysik, når bølger påvirker en strøm i en vandmasse, og opstillede en beregningsmetode for den øgede flydemodstand, der fulgte.

Kredsen af forskere fra ISVA og DHI bidrog også med tredimensionale fysiske modeller for irregulære bølger, hvilket var noget nyt også i et internationalt perspektiv, og opbyggede tilhørende testfaciliteter. Irregulære bølger er en kombination af flere bølger med forskellige bølgelængder og -højder og komplicerede at behandle med almindelig lineær bølgeteori. Vandbygning udviklede sig på ovenstående baggrund til en dansk paradedisciplin.

Brændingszonen

I samarbejde med Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning og Dansk Hydraulisk Institut blev der indført en rationel kystsikring baseret på modelberegninger, som efterfølgende fandt anvendelse i bl.a. Bangladesh. Brændingen var et fascinerende område af hydrodynamikken, som forskere ved de to institutter tog op ved indgangen til 1980'erne. Idealiseringen af den turbulente og delvist kaotiske fysiske proces var krævende, og ledte videre til opstilling af realistiske beregningsmodeller for styrtøer og bølgeover-

slag af ydermoler.

Kollaps af en række vandtekniske konstruktioner i udlandet understregede, at det globale klima var inde i en periode med usædvanligt dårligt vejr. Ved inkludering af brydende bølger forfinede Engelund-skolen modelleringen af sedimenttransport yderligere.

I 1985 frigav DHI sit første beregningsprogram i betalingsversion til installation på PC og bidrog dermed til at åbne det kommercielle marked for computertekniske hjælpemidler på vandbygningsområdet.

Dette skilte sig ud ved at være stort set normfrit, idet rammevilkårene var væsensforskellige for de enkelte konstruktionsopgaver. Konstruktørerne havde derved en grad af frihed i designet af konstruktioner, som var et særsyn inden for bygningsingeniørfaget.

Iltsvind

I ingeniørfaget som helhed gjorde der sig et stadig stærkere ønske gældende om at behandle stadig mere komplekse systemer og problemer via numerisk modellering ⁴².

Tendensen var langt fra uproblematisk, blandt andet fordi forskere og rådgivende ingeniører helst ikke deltog i debatten om samfundets store investeringer, før alle tekniske detaljer var belyst med modeller. Biologerne i særdeleshed forsøgte at monopolisere begrebet bæredygtighed ved at ophøje egne faglige præmisser til en almen standard som overtrumfede bl.a. ingeniørens kompromis mellem det teknisk mulige og omkostningsmæssigt forsvarelige.

I begyndelsen af 1980'erne viste målinger tydelige tegn på nitratforurening af grundvandet. Samtidig skyllede tonsvis af døde fisk ind på danske strande som følge af iltsvind, der fulgte af øget vækst af alger. Landbrugets organisationer fremhævede udledning af næringsstoffer og især fosfor fra industrien og byerne som årsag til iltsvindet. Konklusion stod i åbenlys modstrid med de forudgående års konsekvente indsats for at rense spildevandet fra disse forureningskilder.

Vandkvalitetsinstituttet under ledelse af Palle Schjødtz Hansen og Dansk Hydraulisk Institut, DHI, under ledelse af Torben Sørensen valgte at gøre en undtagelse fra gængse ingeniørfaglige forbehold. De



overlod Hans Schrøder fra DHI opgaven dels at udarbejde en input-output model af kvælstofkredsløbet i dansk landbrug, og dels at relatere den beregnede samlede stigning i udledningen af kvælstof her i landet og i udlandet til fiskedød og iltsvind i de indre danske farvande ⁴³.

Debatten om iltsvindet blev skærpet, da fiskere i Gilleleje i oktober 1986 hjembragte jomfruhummere, der var døde af iltmangel midt ude i Kattegat. Beregningsresultater fra de to uafhængige institutter viste, at kvælstofudledningen fra dansk landbrug var fordoblet fra 1950 til 1980, og at landbruget var den dominerende kilde. Hovedparten af kvælstoffet måtte endvidere være tilført fra udlandet, hvorfor internationale løsninger var påkrævet. I debatindlæg i Berlingske Tidende advarede de involverede forskere om risikoen for eklatante fejlinvesteringer på vandmiljøområdet. Landbruget rasede over den første konklusion, og Miljøstyrelsen over den anden. Og Folketinget afsatte i 1987 uden forudgående

Fiskedød i Århus Bugt. Det voldsomme iltsvind i de danske farvande forårsagede massiv fiskedød i Jyske bugter og vige. Her ses døde fisk i det inderste af Kalø Vig på Mols. Beregningsresultater fra Vandkvalitetsinstituttet og Dansk Hydralisk Institut viste, at kvælstofudledningen fra landbruget var den dominerende kilde og at hovedparten af kvælstoffet måtte være tilført fra udlandet. Denne konklusion var hverken populær blandt landmænd eller i Miljøstyrelsen. (Foto: Claus Bonnerup, gengivet med tilladelse fra POL-FOTO)

konsekvensberegninger 12 mia. kr. til Vandmiljøplanen, der skulle halvere udledningen af kvælstof fra Danmark og reducere udledningen af fosfor med 80 procent.

Samme år vedtog et flertal i Folketinget at realisere den flere gange udskudte beslutning om at opføre en fast forbindelse over Storebælt (se herom senere). Bropillernes påvirkning af salt- og iltbalancen i de indre danske farvande og Østersøen var et debatpunkt. Ydermere blev kravene til gennemsejling sat exceptionelt højt for at minimere risikoen for kollision mellem eksempelvis en olietanker og broen.

Nordsøen

DHI udførte dybvandsforsøg for off-shore industrien, efter at udvindingen af olie og naturgas fra den danske del af Nordsøen tog fart i 1980'erne. Nedlægningen af olie- og naturgasledninger i Nordsøen var et særskilt problem, som blev taget op ved DHI og ISVA. Strømme på tværs af kysten risikerede at underminere de udlagte rør, der måtte dimensioneres og funderes herefter. Erosion i havet fik på samme tidspunkt tilført et miljøperspektiv afledt af den øgede fokus på turisme og rekreative aktiviteter. Bløde parametre og naturbevaring afløste hårde strukturer i relation til kystsikring, hvilket øgede kravene til forståelsen af de bagvedliggende fysiske processer ⁴⁴. Den naturlige eksponering af moler, broer osv. gjorde tillige design til en del af definitionen på bæredygtighed inden for vandbygning. Omvendt forudsatte bæredygtig kreativitet en høj grad af procesforståelse. Som tegn på den danske forskningstradition i sedimenttransports udviklingskraft skrev forskere ved ISVA en international lærebog i sedimenttransport ⁴⁵.

Storebæltsbroen

Miljøfaktorens egentlige gennembrud inden for vandbygning herhjemme indtraf ved indgangen til 1990'erne i tilknytning til den politiske beslutning om at imødekomme en stigende kritik af effekten på havmiljøet af den faste forbindelse, som var under opførelse over Storebælt. Professor Flemming Bo Petersen, Niels-Erik Ottesen Hansen fra rådgivningsfirmaet LIC-engineering samt Jacob Steen Møller fra DHI fremkom med det løsningsforslag at foretage kompensationsudgravninger i tilknytning til broen. Derved var det muligt at opretholde en i det væsentlige uændret vandgennemstrømning gennem bæltet. DHI og LIC Engineering A/S fik overdraget opgaven at foretage de indledende miljøundersøgelser såvel som projekteringen af kompensationsudgravningerne. Metoden vakte opsigt i udlandet.

ISVA og DHI bidrog fra 1991 til et fælles EF-projekt omkring kystsikring med deponering af sand m.v. Baggrunden var stigende opmærksomhed omkring drivhus-effektens mulige indvirkning på vandstanden i verdens have ⁴⁶.

Da et flertal i Folketinget samme år besluttede at bygge en fast forbindelse over Øresund, var effekten på havmiljøet medtænkt fra starten med stramme krav om en nulløsning. Personkredsen bag projekteringen af kompensationsudgravningerne ved Storebæltsbroen påtog sig den opgave. Etableringen af den kunstige Peberholm løste et svensk krav om, at de opgravede materialer fra tunnel og kompensationsudgravninger ikke måtte dumpes andet steds og forplumre vandet.

Ved Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning afdækkede forskere kraftpåvirkningen fra en drivende isflage og opstillede på det grundlag retningslinjerne for udformningen af en bropille, der brød flagerne i stedet for at knuse dem ⁴⁷. Danmark var desuden pioner med hensyn til placering af vindmøller i havet, hvilket gav fagdisciplinen fundering et tiltrængt skub fremad i første halvdel af 1990'erne.

Erosion

Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning skiftede i 1996 det sidste led i titlen ud til Vandressourcer. Det følgende år igangsatte EU-Kommissionen forskningsprogrammet Scour Around Coastal Structures med det vandbygningstekniske forskningsmiljø ved og omkring DTU som selvskreven deltager. Forkortelsen SCARCOST understregede det praktiske mål med programmet - at spare knappe ressourcer.

Når strømmen transporterer sand bort omkring en pæl nedrammet i havbunden, reduceres dyden eller længden af funderingen. Pælen mister dermed bæreevne. Modellering af erosion af en sådan type var en betingelse for at opnå endnu mere omkostningseffektive og holdbare molekonstruktioner o.l. EU støttede desuden forskningen i hydrauliksoftware, og DHI markedsførte fra slutningen af 1990'erne en række specialmodeller for bølge- og strømningsdannelsen i kystnære områder til modellering af sedimenttransport- og erosionsmønstre omkring forskellige typer af faste konstruktioner.

En grundvandsmodel blev ligeledes bragt på markedet tillige med en matematisk model for iltsvindet i de danske farvande. Anledningen var



Sprogø er knudepunkt for Storebæltsforbindelsen
(Foto: Gengivet med tilladelse fra Sund & Bælt).

Folketingets vedtagelse af en ny vandmiljøplan.

Entusiasmen hos de tænkte brugere i form af danske myndigheder var begrænset, mens salget i udlandet gik noget bedre. Simuleringsprogrammet LITPACK til beregning af langtidseffekterne af forskellige former for kystsikring opnåede større succes i Danmark. Integration med GIS-systemet var standard for de større softwaremodeller fra DHI, hvilket øgede mulighederne for fjernkontrol m.v.

Ved årtusindeskiftet blev SCARCOST afløst af Liquefaction Around Marine Structures, LIMAS. LIMAS var en del af EU-programmet "Energy, Environment and Sustainable Development". Liquefaction opstår i jord mættet med vand under et jordskælv og er blandt de mest ødelæggende effekter i den forbindelse.

I 2001 begyndte anden fase i moderniseringen og centraliseringen af DTU's struktur. ISVA blev nedlagt og en del af aktiviteterne overført til det nye storinstitut for Mekanik, Energi og Konstruktion. Resten blev overflyttet til det ligeledes nydannede Institut for Miljø og Ressourcer, der også tilkom at rumme Institut for Geologi og Geoteknik samt Institut for Miljøteknologi. Sidstnævnte havde tidligere opslugt faget Teknisk Hygiejne.

Året efter nedlæggelsen af ISVA udkom på ny en international lærebog forfattet af forskere fra det nu forhenværende institut ⁴⁸. I 2004 blev Sektionen for Vandbygning under M-retningen slået sammen med Sektionen for Maritim Teknik til Sektion for Skibe, Kyster og Konstruktioner.

Laboratoriet for Bygningsteknik

Bygningsstatikken var som redskabsfag det historiske omdrejningspunkt for bygningsingeniørfagets videnskabeliggørelse. Opstilling af forenklede matematiske ligningssystemer på basis af de fundamentale fysiske naturlove var en forudsætning for rationel beregning af sikre dimensioner for alle typer af bærende konstruktioner. Styrkelæren indgik i tæt samspil med materialelæren, der gennem laboratorieøvelser havde til formål at kortlægge forskellige bygningsmaterialers styrke m.v. samt at bidrage til udviklingen af forbedrede materialer.

Det amerikanske rustningsprogram under 2. Verdenskrig og i særdeleshed udviklingen af atombomben satte for alvor Materials Science på dagsordenen. Laboratoriet for Byggeteknik, hvorunder den bygningstekniske materialeprøvning ved Danmarks Tekniske Højskole hørte, blev i 1950 fusioneret med Afdelingen for Bygningsstatik, Jernkonstruktioner & Jernbetonbroer. Det nydannede Laboratorium for Bygningsteknik blev dog formelt opdelt i en afdeling A for elasticitets- og styrkelære med fire ud af i alt fem professorater og en afdeling B for byggematerialer og byggeteknik. Professor Axel Efsen ledede som professor i jernbeton sidstnævnte afdeling og startede i 1954 undervisning i planlægning og kalkulation af bygge- og anlægsarbejder, en disciplin, der var vokset voldsomt i omfang.

K. W. Johansen

Afdeling A ved Laboratoriet for Bygningsteknik fik K. W. Johansen som leder, der samtidig overtog P. M. Frandsens professorat i bærende konstruktioner. K. W. Johansen havde i årene forinden fornyet det nedarvede bygningsstatiske teorigrundlag ⁴⁹.

Det er normalt nødvendigt at supplere statiske beregninger med beregninger af en konstruktions stivhed, idet deformationer, i lighed med regelrette brud på byggekomponenter, kan føre til uanvendelige konstruktioner eller i værste fald kollaps. Ostenfeld og hans samtidige behandlede elasticitetsslæren, der umiddelbart fik forrang over styrkelæren. Elasticitetsteorien var groft sagt kun halvvejs rationel, idet den forudsatte en lineær sammenhæng mellem stigende kraftpåvirkning og den resulterende spænding i en byggekomponent op til brud, hvilket i almindelighed er en grov tilnærmelse.

Brugen af elasticitetsteori til brudberegninger sammen med den indbyggede sikkerhedsmargin affødte et overforbrug af ressourcer samt ikke-rationelle designbegrænsninger, hvilket bygge- og anlægsboomet efter 1945 om noget understregede. Misforholdet var mest markant, hvor en jernbetonkonstruktions bærevne hovedsageligt var bestemt af armeringen som f.eks. i de stadig mere dristigt udførte pladekonstruktioner. K. W. Johansen påviste

via belastningsforsøg, at et brud i materialets plastiske fase normalt vil udbrede sig systematisk enten som uendeligt mange brudlinjer eller langs nogle få veldefinerede brudflader. Han påtog sig den yderst krævende forskningsudfordring at modellere den indsigt til en teknisk brudlinjeteori til brug for den praktisk arbejdende bygningsingeniør ⁵⁰. K. W. Johansens lærebøger udkom på engelsk såvel som i en portugisisk oversættelse til det brasilianske marked, og han blev en af fadderne til den moderne plastiske teori. Johansen var en ilter personlighed med en del personlige kæpheste. En anstødssten var normerne, der i følge ham mestendels var baseret på overtro og virkede kvælende på bygningsingeniørfaget.

TV-master

Udbygningen af den danske infrastruktur kastede kun få større brobygningsopgaver af sig i de første årtier efter krigen. Derimod var markedet for stort set alle andre typer af anlægskonstruktioner voksende. Kunderne efterspurgte stadigt mere dristige tekniske løsninger. Forbedrede stålqualiteter og spændbeton gav bygningsingeniørerne gode muligheder for at indfri ønskerne. Bærende stålkonstruktioner af anseelige dimensioner indgik i ejendoms- og erhvervsbyggeri, kraftværker, krananlæg osv. samt master.

En høj slank mast understøttet elastisk med barduner belastet af vinden er et komplekst statisk og dynamisk system, som yderligere kompliceres af eventuel isdannelse. Opstilling af matematiske beregningsformler til rationel dimensionering af gittermaster rummede således et betydeligt forskningsmæssigt og udviklingsmæssigt potentiale.

Christian Nøkkenved havde i 1920'erne grundlagt en dansk forskningstradition i gittermaster, som professor i bygningsstatik Johan G. Hannemann videreførte efter 2. Verdenskrig. På hans foranledning gik man i Danmark over til at anvende trekantede gitterkonstruktioner af massive rundjern ved bl.a. opførelse af radio- og TV-master, hvilket nærmest var en verdensnyhed. I forhold til de hidtil anvendte vinkeljern, var rundjern vanskelige at bearbejde og dårlige til at optage trykkræfter. Rundjern udmærkede sig derimod ved en lav vindmodstand og fremstilling-

spris og lod sig svejse på i en delvist automatiseret fabrikation som alternativ til dyr montering af vinkeljern med bolte og møtrikker.

Storrumssiloer

Danske bygningsingeniører og entreprenørselskaber havde med K. W. Johansens brudlinjeteori fået et slagkraftigt redskab, der overflødiggjorde en lang række af elasticitetsteoriens komplicerede og tidsrøvende beregninger. Bygningsingeniørfaget i de større lande var typisk mere normbundet end i de mindre lande. Derfor havde Danmark en international konkurrencefordel.

Op gennem første halvdel af 1900-tallet havde bygningsingeniører ansat ved danske entreprenørselskaber både anvendt og bidraget til den danske teoridannelse inden for jernbetonkonstruktioner. Den praksis fortsatte efter 1945 med storrumssiloer til opbevaring af korn, sukker, kul, vand osv. som et centralt eksempel. A. S. Ostenfelds søn, Christian, var medejer af entreprenørselskabet Ostenfeld & Jønsson, som i begyndelsen af 1950'erne udviklede en prisbillig beholdertype i samarbejde med De Danske Sukkerfabrikker. Kabler indlagt i beholdervæggen sikrede stabiliteten. Kontinuerlig udstøbning af betonen ved hjælp af en mobil støbeform - glideforskalning - overflødiggjorde arbejdskrævende, midlertidige stilladskonstruktioner.

Med K. W. Johansen som vejleder opstillede den licentiatstuderende Mogens Peter Nielsen i 1962 en plasticitetsteori for jernbetonplader, idet den oprindelige brudlinjeteori ikke umiddelbart gjaldt for kompositmaterialer.

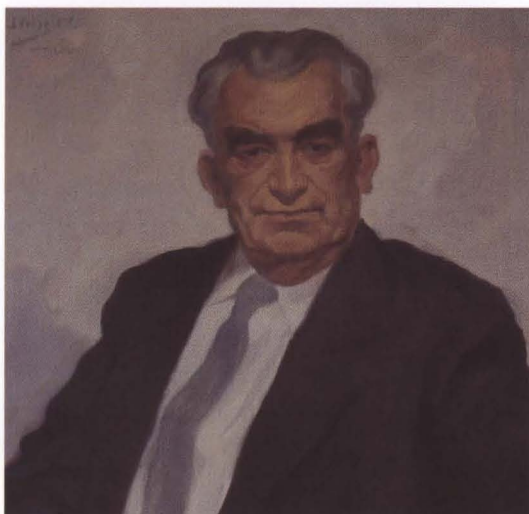
Troels Brøndum-Nielsen efterfulgte Axel Efsen som professor i betonkonstruktioner i 1963 og blev leder af afdeling for byggematerialer og byggeteknik ved Laboratoriet for Bygningsteknik ⁵¹. Brøndum-Nielsen udgav året efter lærebøgerne *Spændbetontanke* og *Cylinderskaller*.

Herbert Krenchel, der var maskiningeniør af uddannelse, forskede i fiberarmering ved laboratoriet. Tilsætning af fibre, især asbestfibre, til cement til tagplader, rør og andre byggekomponenter var en indarbejdet praksis for at øge holdbarhed og mod-

standsdygtighed - heraf handelsnavnet Eternit. Asbest var erkendt kræftfremkaldende, og i samarbejde med Dansk Eternitfabrik A/S søgte Krenchel som en af pionererne at udvikle asbestfrie cementbaserede kompositmaterialer.

Svendborgsundbroen

Den stigende bilisme satte i 1960'erne på ny gang i projektering herhjemme af højbroer og, som noget nyt, også tunneler. Projekterne var udelukkende indrettet på biltrafik og jernbeton var selvskrevet som byggemateriale.



Anker Engelund var bygningsingeniør, cand. polyt. fra 1912. Han læste til bygningsingeniør i de år hvor Asger Ostenfeld førte uddannelsen frem til en af de absolut bedste i hele verden. Engelund havde en overordentlig succesfuld akademisk karriere, der i 1928 bragte ham frem til et professorat i bygningsstatik på Den polytekniske Læreanstalt. Han blev siden prorektor (1937) og rektor (1941-59). Ved siden af dette forestod han fra 1924 og frem til sin død i 1961 projekteringen og gennemførelsen af en lang række broer i Danmark og udlandet, herunder broerne over Roskilde fjord, Lillebælt, Storstrømmen og Limfjorden ved Aalborg. Flere af disse broer viser en sjælden evne til at kombinere det tekniske med det kunstneriske – de står den dag i dag som monumenter over en tidsalder. (Foto: www.past.dk)

Broen mellem Svendborg og Tåsinge i det sydfynske øhav stod færdig i 1966 og markerede både den foreløbige kulmination på en dansk ingeniørspecialitet og ændrede politiske rammevilkår. Udkastet til broen var udarbejdet af Anker Engelund, der var professor i bærende konstruktioner og rektor for Danmarks Tekniske Højskole 1941 - 59.

For at sikre størst mulig effektivitet i byggefasen var broen over Svendborgsund projekteret ikke som en buebro, men som en bjælkebro med fri frembygning med præfabrikerede standardelementer ud fra de enkelte bropiller. Engelund afgik ved døden i 1961, hvorefter professor Hannemann og Poul Møller Nielsen fuldførte projektet.

Af hensyn til broens visuelle påvirkning af det omkringliggende landskabs herlighedsværdi, blev de oprindeligt planlagte massive pilleskafter erstattet med slanke dobbeltsøjler af beton og overbygningens højde reduceret til blot 4,5 meter ved pillerne og 1,8 meter ved fagmidten. De positive erfaringer fra dette projekt medvirkede til en industrialisering af byggeriet af større broer af jernbeton, hvorved initiativet gled fra broekspærterne og over til entreprenørselskaberne.

Byggeriet af Danmarks første betydelige hængebro i anden halvdel af 1960'erne over Lillebælt var en markering heraf. Tilsvarende havde byggeriet af Danmarks første sænketunnel under Limfjorden 1965 - 69 Christiani & Nielsen som projekterende og udførende part. Med hensyn til byggeriet af motorvejsbroer i jernbeton, var entreprenørselskaberne var også i teten.

Mogens P. Nielsen

I 1969 blev Laboratoriet for Bygningsteknik ført tilbage til det historiske udgangspunkt ved en opspaltning i et Laboratorium for Bygningsmaterialer med et professorat og en Afdeling for Bærende Konstruktioner med fire. Professor Torben Hansen ledede førstnævnte og havde speciale i udvikling af bygningsmaterialer egnet til tropiske forhold⁵². Et andet indsatsområde ved Laboratoriet for Bygningsmaterialer var materialetæthed forårsaget af vibrationer. M. P. Nielsen overtog i 1972 professoratet ved Afdeling for Bærende Konstruktioner efter K. W. Johansen, hvis brudlinjeteori han havde udviklet til et samlet koncept for en plastisk teori for beton og armeret beton. M. P. Nielsens indsigt i den klassiske mekanik var opsigtsvækkende og kombineret med matematiske færdigheder ud over det sædvanlige for ingeniører. Det samme gjaldt hans indædte modstand



Stålkonstruktioner fik øget betydning for den praktiske forskning ved Laboratoriet for Bygningsteknik i 1970'erne. Det gjaldt gittermaster og ikke mindst tagkonstruktioner i flyhangarer, haller, koncertsale og indkøbscentre som her City 2 i Taastrup, der åbnede i 1975 og havde et tagareal på 100.000 m². (Foto: Gengivet med tilladelse fra Rambøll Gruppen A/S).

mod styrelsesreformen og overgangen til friere studier, som mindskede interessen for bygningsstatik. M. P. Nielsen var godt på vej til at blive et verdensnavn og opbyggede et stærkt forskningsnetværk inden for den svært tilgængelige plastiske teori. Udviklingen var sammenfaldende med den almene tendens til matematisk formalisering inden for ingeniørdisciplinerne.

I tæt samarbejde med Dansk Center for Anvendt Matematik og Mekanik DCAMM søgte Afdelingen for Bærende Konstruktioner at udvikle computerprogrammer⁵³. Ved konsekvent at stræbe efter at opstille praktisk anvendelige beregningsmodeller med inddragelse af laboratorieforsøg undgik M. P. Nielsen og hans elever trods et højt ambitionsniveau at isolere sig.

Niels Jørgen Gimsing og Danmarks Ingeniørakademi

I 1976 blev Niels Jørgen Gimsing udnævnt til professor i stålkonstruktioner ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner efter Hannemann. Gimsing havde opnået både en første- og andenplads i konkurrencen om en bro over Storebælt og kom fra en stilling ved bygningsafdelingen under Danmarks Ingeniørakademi, der var flyttet med Danmarks Tekniske Højskole ud til Lundtofte-sletten.

Akademiet blev opfattet som lillebror af "Læreanstalten", men havde opbygget egne forskningsmiljøer. Den stigende politiske interesse for udnyttelse af olie- og naturgasforekomsterne i den danske del af Nordsøen gav anledning til, at bl.a. Steen Krenk og Henning Agerskov ved Afdelingen for Bærende Kon-

struktioner påbegyndte forskning i offshore-konstruktioner i tilknytning til træthedsbrud. Vindmøller var et relateret forskningsfelt, som professor Vagn Askegaard bidrog til ⁵⁴. Ved Laboratoriet for Bygningsmaterialer udviklede Earthquake Engineering sig til et særligt forskningsområde i samarbejde med Institut for Strømningsmekanik og Vandbygning. Samtidig blev forskningen i traditionelle byggematerialer som træ, sten og (genbrugs)beton tilgodeset i bestræbelserne på at fremme en renere byggeteknologi ⁵⁵.

Afdelingen for Bærende Konstruktioner tabte dog i nogen grad momentum i anden halvdel af 1980'erne og ikke kun som følge af reducerede budgetbevilgninger til civilingeniøruddannelsen. Den plastiske teori havde nået et så højt niveau, at gevinsten ved yderligere forfinelse var begrænset. En anden baggrundsfaktor var fremkomsten af standardcomputerprogrammer til løsning af komplekse ligningssystemer.

Storebæltsbroen

Fornyelsen inden for de øvrige bygningstekniske fagdiscipliner siden 1970'erne var i vidt omfang fremprovokeret af miljøfaktoren, som havde få umiddelbare berøringsflader med bygningsstatikken. Folketingets beslutning i 1987 om at bygge en fast forbindelse over Storebælt tilførte på den baggrund Afdelingen for Bærende Konstruktioner en dynamik, der næppe kan overvurderes ⁵⁶.

Modsat efterkrigstidens store broprojekter skulle den planlagte forbindelse overføre både bil- og togtrafik, hvilket rejste en række principielle tekniske dimensionerings- og materialerelaterede problemer, som blev forstærket af ydre forhold. Med sine over 13 kilometer ville broen blive verdens længste. Storebælt var internationalt farvand og blandt verdens mest trafikerede, hvorfor fri passage for selv de største skibstyper var en nødvendighed. På krav fra Socialdemokratiet skulle den offentlige trafik have en fordel, og en jernbaneforbindelse stå færdig i 1994. Først tre år senere skulle en forbindelse for biltrafik indvies.

Professor Gimsing deltog som ekspertrådgiver for myndighederne, og forskere fra B-retningen medvirkede generelt i analysen af forskellige løs-

ningsmuligheder ⁵⁷. En kombineret bil- og togbro over Østrenden var bl.a. til seriøs overvejelse. Afdelingen for Bærende Konstruktioner udførte en række laboratorie- og modelforsøg med henblik på analyse af metaltræthed, der var en betydende faktor i dimensioneringen af en brooverbygning med et frit spænd i nævnte størrelsesorden såvel som af bærekablerne.

Analysen af samspillet mellem vejbanen - cement og asfalt - og underbygningen - stål - var også nødvendige. Den billigste løsning var sandsynligvis at bygge enten en tunnel under eller en bro over Storebælt. For at kunne adskille tog og biler valgte politikerne dog kombinationen af en hængebro til biler og en boret jernbanetunnel begge fra Sjællandssiden og til Sprogø midt i bæltet. Fra Sprogø og til Fynssiden skulle biler og tog overføres via en lavbro.

Skibe i internationalt farvand er fritaget for lodspligt. Men fra politisk side blev der af miljøhensyn rejst krav om at nedbringe kollisionsrisikoen mellem skibe og broen til et absolut minimum. Afdelingen for Bærende Konstruktioner medvirkede til en bredspektret computersimulering af sejladsen gennem bæltet, der viste, at en gennemsejling på minimum 1,6 kilometer var en forudsætning herfor.

En bro med et frit spænd af de dimensioner var ikke tidligere bygget noget steds i verden og omfattende analyse af vindbelastningen blev udført ved Danmarks Tekniske Højskole af hensyn til den optimale udformning. Broen skulle kunne modstå



Kompensationsudgravning i forbindelse med bygningen af Øresundsforbindelsen (Foto: Gengivet med tilladelse fra Sund & Bælt)

et vindtryk på 60 meter i sekundet, hvor den hidtil højeste målte vindhastighed ved Storebælt var 36 meter i sekundet. Også udformningen af bropillerne blev behandlet, idet sådanne per dansk tradition var dimensioneret for istryk og ikke skibsstød.

Byggeriet af Storebæltsforbindelsen gik i gang i 1988, og projektet fik ikke blot en positiv effekt på forskningen ved B-retningen. Danske entreprenørselskaber og rådgivende ingeniørfirmaer indhøstede værdifulde erfaringer bl.a. ved at indgå i konsortier med de førende internationale brobygningsfirmaer.

Øresundsbroen

I 1991 godkendte den svenske Riksdag og det danske Folketing anlægget af en fast forbindelse over Øresund med Storebæltsforbindelsen som forbillede, men med skærpede miljøkrav. Igen var der tale om internationalt farvand, og samtidig var der hensyn til indflyvningen til lufthavnen i Kastrup at tage. Risikoen for alvorlige skibskollisioner var mindre i Øresund, hvorfor et hovedfag på 490 meter var tilstrækkeligt.

En kunstig skabt ø i Øresund - Peberholm - skulle tjene som afsæt for dels en højbro over Flinterenden til Skåne og en nedgravet sænketunnel ind til Amager til overførsel af såvel biler som tog. Peberholmen fungerede derudover som deponering af de opgravede materialer fra anlæggelsen af selv samme tunnel. Tunnelelementerne på hver 55.000 tons var verdens hidtil største. Professor Gimsing deltog i det internationale rådgivningsfirma, der vandt licitationen om stålbroen i to dæk over Øresund. Der var tale om verdens længste bro af sin art, men der forelå værdifuldt analysemateriale i skitserne til en vej- og togbro over Storebælt.

Ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner blev der på basis af computer-modellering beregnet alternative bærekabelsystemer og man imødekom behovet for yderligere forskning i metaltræthed.

Servicelev

De faste forbindelser over Storebælt og Øresund var ikke alene om at påvirke Afdelingen for Bærende Konstruktioners teoretiske profil. I 1991 blev Ove

Ditlevsen udnævnt til professor i sikkerhed og belastning i byggekonstruktioner⁵⁸. En væsentlig del af industrilandenens infrastruktur nærmede sig, eller havde allerede passeret, den forventede tekniske levealder, hvilket gav bygningsstatikken en direkte kobling til miljøspørgsmålet. Trafikintensiteten, såvel som akseltryk, var desuden øget i forhold til den belastning, som broer osv. oprindeligt var dimensioneret til. Markedet for renovering ville skønsomt vokse til op mod 40 procent af den totale omsætning inden for bygge- og anlægssektoren. Fremtidigt servicebehov måtte på den baggrund inddrages på linje med konstruktionernes bæreevne ved analyser af nybyggeri.

Eftersom den klassiske styrkelære ikke rakte til rationelle vurderinger af konstruktioners levetid og servicebehov, fik bygningsstatikkerne mulighed for at etablere en selvstændig niche inden for bæredygtigt byggeri gennem numerisk modellering af nedbrydelsesprocesser. Ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner og Materialer søgte Henrik Stang at opstille en brudmekanisk baseret skadesteori for fiberbeton og bidrog dermed til at videreudvikle traditionen fra M. P. Nielsen og Ostenfeld på mikromekanisk niveau⁵⁹.

Herbert Krenchel fortsatte forskningen i cement-baserede kompositmaterialer. Det blev dog kompositmaterialet Carbon Fiber Reinforced Plastic, som for alvor åbnede markedet for renovering i form af forstærkning af alle typer bærende konstruktioner af beton, stål og træ.

Optiske fibre til indføring i centrale konstruktionselementer bidrog ligeledes til markedsudviklingen, idet de muliggjorde styrkemålinger på broer m.v. under drift. EU søgte at fremme anvendelsen af kulfiberarmering og andre kompositmaterialer, og entreprenørselskaber og rådgivende ingeniørfirmaer efterspurgte bygningsingeniører med specialviden på området.

Med ansættelsen af Björn Täljsten som professor i 2005 fik DTU-BYG tilgang af en international kapacitet inden for forstærkning og renovering. Jeppe Jönsson blev ansat som professor i Design of Civil Engineering Structures samme år, og Henrik Stang blev i 2006 udnævnt til professor i integreret model-

lering af bærende konstruktioner og materialer ved instituttet. Udviklingen inden for anvendelsen af nye kompositmaterialer til renovering foregik i sammenhæng med introduktionen af Architectural Engineering herhjemme og igen med DTU som udfarende kraft jvf. afsnittet om husbygning. Den stigende anvendelse af kompositmaterialer har bidraget til at nedbryde den skarpe adskillelse mellem bygningsstatik og de øvrige bygningstekniske fagdiscipliner.

I forbindelse med oprettelsen af DTU-BYG blev Laboratoriet for Anlægsteknik genoplivet i form af en sektion for Planlægning og Ledelse af byggeprocesser, der skulle imødekomme et voldsomt stigende behov hos aftagerne af de færdige kandidater. Karakteristisk for den bygningstekniske forskning ved DTU og dets forgængere efter 2. Verdenskrig har været evnen og viljen til fornyelse forstået som at bidrage til tidssvarende definitioner på omkostningseffektiv bæredygtighed uden at sætte de ingeniørfaglige dyder over styr.

Danske entreprenørselskaber og rådgivende ingeniørfirmaer har udvist en tilsvarende dynamik. E. Pihl & Søn A/S, der fik et gennembrud i forbindelse med byggeriet af Hanstholm Havn, er således i dag nummer 74 på listen over verdens største internationale entreprenørselskaber, der også tæller Per Aarsleff A/S⁶⁰. En endnu mere markant international tilstedeværelse har de danske rådgivende ingeniørfirmaer COWI A/S, Rambøll Gruppen A/S samt Carl Bro, der nu indgår i den hollandske Grontmij-koncern.

Det moderne industri- og servicesamfund skylder ingeniør- og naturvidenskaberne sin eksistens. Dette skrift viser nogle få aspekter af den indflydelse bygningsretningen på DTU har haft på det omgivende samfund.

Forskningsvisionen for det nuværende BYG•DTU er at blive blandt Europas førende byggetekniske universiteter og en foretrukken samarbejdspartner for virksomheder og myndigheder. Hvis denne vision opfyldes kan den danske bygningsingeniør stå overfor en ny guldalder.

Øresundsbroen i morgenlys. Øresundsbroen er verdens længste skråstagsbro for både motorvej og jernbane. Den består af højbroen og to tilslutningsbroer. (Foto: Torben Åndahl, gengivet med tilladelse fra POLFOTO)



Referencer

- ¹ Henrik Harnow, *Viden om - den danske tekniske rådgivnings historie 1850 til i dag* (Skive, 2004), s. 21.
- ² S. B. Hamilton, The Historical Development of Structural Theory, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1:1952, part 3, s. 374 - 419;
S. P. Timoshenko, *History of Strength of Materials* (New York, 1953).
- ³ <http://taybridgedisaster.co.uk/>
- ⁴ Henrik Harnow, *Den Danske Ingeniørs Historie 1859 - 1920* (Gylling, 1998), s. 48-64.
- ⁵ Henrik Harnow, *Den Danske Ingeniørs Historie 1859 - 1920* (Gylling, 1998), s. 88.
- ⁶ Foredrag af Ostenfeld holdt ved eksamensafslutningen ved Den Polytekniske Læreanstalt 31. januar 1912. Gengivet i *Ingeniøren*, 1912, nr. 14.
- ⁷ Chr. Ostenfeld, *A. Ostenfeld og hans samtid: Et minde-skrift samt træk af de bærende konstruktioners historie 1866 - 13. oktober - 1966* (København, 1966).
- ⁸ Samme år udkom på tysk *Die Deformationsmethode* som kronen på Ostenfelds hidtidige arbejder hen imod en generel matematisk elasticitetsteori og -beregnings-metode.
- ⁹ A. H. M. Andreasen (red.), *Den Polytekniske Lære-anstalt: Danmarks Tekniske Højskole fylder 125 år* (København, 1954).
- ¹⁰ Bent Thagesen, Træk af vej-, trafik- og byplanfagenes historie på Den Polytekniske Læreanstalt (DTU Lyngby, 2001), s. 17. A. R. Nielsens barndomshjem er bevaret som Nationalmuseets Klunkehjem.
- ¹¹ Jørgen Nielsen, Dansk Selskab for Bygningsstatik 50 år, *Bygningsstatiske Meddelelser*, 1978, nr. 3, s. 69 - 92.
- ¹² Steen Andersen, *De gjorde Danmark større ... De multinationale danske entreprenørselskaber i krise og krig 1919 - 1947* (Århus, 2005).
- ¹³ Grundlæggerne af entreprenørselskabet Kampsax var også at finde i personkredsen.
- ¹⁴ Flemming Møller, *Kampsax fra starten 1917 til omkring 1960*, indberetning nr. KX 1 (COWIgruppens Historiske Samling, 2005).
- ¹⁵ Inge Berg Hansen (red.), *DTH: Den Polytekniske Læreanstalt Danmarks Tekniske Højskole - Polyteknisk undervisning og forskning i det 20. århundrede, fest-skrift ved 150-års jubilæet* (Lyngby, 1979), s. 247.
- ¹⁶ *Presentation of Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1959 - 1979* (Lyngby, 1979), s. 1 - 2; *Laboratoriet for Varmeisolering, Laboratoriet for Energiforskning 1959 - 1984*, rapport nr. 150 (Lyngby, 1984), s. 1 - 39.
- ¹⁷ Energibesparelser i bygninger: Status over forsknings- og udviklingsaktiviteter ved DTU, Rapport R-088 (BYG-DTU, september 2004).
- ¹⁸ Villumsens forskning havde særligt rettet sig mod grundvandsforsyningen og rensning af jord forurenet med tungmetaller.
- ¹⁹ www.greenland-innovation.com.
- ²⁰ Klaus Thiesen, *Træk af 150 års landmålingsunder-visning på Den Polytekniske Læreanstalt og Land-målervej*, Særtryk, Lyngbybogen (Lyngby, 2007)
- ²¹ Metoderne bruges stadig til kortlægning i Grønland sammen med andre fotogrammetriske målemetoder.
- ²² Per Milner, *Det store motorvejs-H i Munch-Petersen* (red.), *Danske bygningsingeniørers virke* (Viborg, 2003), s. 117 - 28.
- ²³ N. O. Jørgensen, Tom Rallis og Jens Rørbech m.fl. (red.), *Kollektiv trafik i byer, forstæder og landomstrik-ter: festskrift i anledning af professor, dr. techn. P. H. Bendtsen's 70 års dag den 13. august 1977* (Køben-havn, 1977), s. 26. Bendtsen var den første her-hjemme, som blev teknisk doktor på en trafikteknisk afhandling.
- ²⁴ Bent Thagesen, *Træk af vej-, trafik- og byplanfagenes historie på Den Polytekniske Læreanstalt* (DTU Lyngby 2001), s. 25. Axel O. Bohn blev i 1964 som den første herhjemme teknisk doktor på en vejteknisk afhandling med *Asfaltemulsioners Brydning* som emne.
- ²⁵ Axel O. Bohn, Faldloddets historie, *Asfalt*, 1989, nr. 112, s. 4 - 11.
- ²⁶ *Dansk Vejtidskrift*, 1964, nr. 12, s. 237;
Jens Rørbech, *The multi-lane traffic flow process: an evaluation of queuing and lanechanging patterns; a Markov-model* (Lyngby, 1974).
- ²⁷ A. Skjoldby, Et 5 års forsøgsprogram for vejprøv-ningsmaskinen på Danmarks Tekniske Højskole, *Dansk Vejtidskrift*, 1978, nr. 1, s. 4 - 7 og 10.
- ²⁸ Per Ullidtz og Christian Busch, *Laboratory testing of a full scale pavement* (Lyngby, 1978). Udgangspunktet var delvist en prøvemaskine udviklet i 1946 af civilingeniør Ingvar Petersen (A/S Pankas).
- ²⁹ Morten Elle, *Byøkologiske Fremtidsbilleder* (Teknologinævnet, København, 1992).
- ³⁰ Per Ullidtz, *Pavement Analysis* (Amsterdam, 1987).
- ³¹ Morten Elle, Susanne Balslev Nielsen, Birgitte Hoffmann og Jesper O. Jensen, *The seven challenges of sustainable cities, Sustainable Urban Infrastructure, approaches - solutions - methods* (Trento 2004, s. 379-387 og 426.
- ³² Skønsmæssigt havde 40 procent af de beskæftigede inden for praktisk byplanlægning eller byledelse en ingeniørbaggrund. Arkitekterne udgjorde en tilsvarende andel og samfundsvidenskabelige kandidater de rester-ende 20 procent.
- ³³ Troels Brøndum-Nielsen, *Spændbeton* (2. udg., Lyngby 1976), s. 1 - 5.

- ³⁴ Knud Højgaard, Danske bygningsingeniørers virke gennem 100 år, *Ingeniøren*, 1957, nr. 29, s. 788 - 791. Kandidaterne fra B-retningen udgjorde henholdsvis 41 og 38 procent af det totale antal nyudklækkede ingeniører fra læreanstalten i de respektive år. Af 516 bygningsingeniører uddannet ved læreanstalten 1946 - 55 var 200 beskæftiget ved offentlige myndigheder svarende til niveauet tidligere, mens 100 var beskæftiget hos entreprenørselskaber svarende til en noget lavere andel end tidligere. Rådgivende ingeniører beskæftigede 163 af kandidaterne og handelsvirksomheder 53, hvilket i begge tilfælde var udtryk for en stigning.
- ³⁵ Richard Jessen, *Instituttet for Husbygning - instituttets historie indtil 1975* (Danmarks Tekniske Højskole, 1980).
- ³⁷ Ved bygningsretningen udførte Laboratoriet for Hydraulik de fleste typer af hydrauliske forsøg under ledelse af professor Aage Bretting. Han opstillede for eget vedkommende formler til beregning af vandførings- og selvrensningsevnen i cirkulære rør. Formlerne fandt anvendelse også i udlandet.
- ³⁸ Torben Sørensen, Jørgen Fredsøe og Per R. Jacobsen, History of Coastal Engineering in Denmark, i Nicholas C. Kraus (red.), *History and Heritage of Coastal Engineering* (New York, 1996), s. 103 - 41.
- ³⁹ Niels J. Gimsing, Over sø og land - den faste Storebæltsforbindelse og Danmarks broer, i Carsten Broder Hansen (red.), *Overskud på videnbalancen - DTU 175 års jubilæum 1829 - 2004* (Svendborg, 2004), s. 16.
- ⁴⁰ Jens Kirkegaard Jensen og Torben Sørensen, Measurement of sediment suspension in combinations of waves and currents, *Proceedings of the 1th. International Coastal Engineering Conference*, Vancouver 1972, s. 1097 - 1104.
- ⁴¹ Maskinretningen ved Danmarks Tekniske Højskole trængte ind på vandbygningsområdet med oprettelsen af Dansk Center for Anvendt Matematik og Mekanik, hvorfra blev Abbott blev hentet. Han havde før dette været ansat ved Laboratoriet for Havnebygning.
- ⁴² Jacob Steen Møller, Den frie forsker har aldrig eksisteret som andet end en drøm, interview i *Videnskabelighed - femten portrætter*, Rapport fra Analyseinstitut for Forskning, 2001/3, s. 119 - 27.
- ⁴³ Hans Schrøder, *Et økologisk råd: om vandmiljøplanen, ilten i havet og økologiske helhedsbetragtninger* (København 1990), s. 10 - 19.
- ⁴⁴ Ida Brøker, Rolf Deigaard og Jørgen Fredsøe, Onshore/offshore sediment transport and morphological modeling of coastal profiles, *Proceedings, Coastal Sediments*, 1991, ASCE, s. 643 - 57.
- ⁴⁵ Jørgen Fredsøe og Rolf Deigaard, *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, Advanced Series on Ocean Engineering, volume 3 (Singapore, 1992).
- ⁴⁶ DHI fusionerede i begyndelsen af 1990'erne med Vandkvalitetsinstituttet og senere Dansk Toksikologi Center og fik WHO som samarbejdspartner.
- ⁴⁷ P. Tryde, C. Sørensen og B. Feddersen, *Ice forces - a brief review and functional design of bridge piers with reference to ice forces: introducing super-elliptic forms*, RH & H Bulletin, nr. 37 (Lyngby 1992).
- ⁴⁸ Jørgen Fredsøe og B. Mutlu Sumer, *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*, Advanced Series on Ocean Engineering, volume 17 (Singapore, 2002).
- ⁴⁹ K. W. Johansen, *Brudlinieteori* (København, 1943), s. 15. Johansen var inspireret af Åge Ingerslevs artikel Om en elementær Beregningsmetode af krydsarmerede Plader, *Ingeniøren*, 1921, nr. 69, s. 507 - 515. I modsætning til Ingerslev opererede Johansen imidlertid ikke med sprøde brud.
- ⁵⁰ K. W. Johansen, *Pladeformler* (København, 1949).
- ⁵¹ Aage Jespersen blev i 1962 udnævnt til professor i anlægsteknik ved et nyoprettet laboratorium af samme navn tilknyttet Laboratoriet for Bygningsteknik. Entreprenørforeningen og Foreningen af Rådgivende Ingeniører var blandt initiativtagerne. Ledelse og drift af byggeopgaver indgik i undervisningen; Laboratoriet for Anlægsteknik, *Laboratoriet for Anlægsteknik 1962 - 72* (Lyngby 1972), s. 3 - 4.
- ⁵² Cläes Dyrbye, A Century of Materials and Structures, *Papers in Structural Engineering and Materials: A Centenary Celebration* (DTU, 2000), s. 1 - 14.
- ⁵³ Mikael W. Brædstrup, Concrete Plasticity: the Copenhagen Shear Group 1973 - 79, *Bygningsstatiske Meddelelser*, 1994, nr. 2 - 3 - 4, s. 33 - 89.
- ⁵⁴ Vagn Askegaard, *Laboratorieforsøg med prøvevinge af glasfiberarmeret polyester*, sagsrapport S 34:78 (Lyngby, 1979).
- ⁵⁵ Anders Nielsen, *Byggeteknisk fugtmekanik - en oversigt over problemstillinger og fremtidige udviklingsopgaver* (Teknologisk Institut, Tåstrup, 1984).
- ⁵⁶ Vandbygningsfagene under B-retningen fik tillige et løft jvf. tidligere afsnit givet det politiske krav om en i det væsentlige uændret vandgennemstrømning gennem bæltet.
- ⁵⁷ Niels J. Gimsing, Design of bridges - the Danish way, i Kristian Stubkjær og Tine Kortenbach (red.), *Bridging from technology to society* (DTU 2004), s. 22 - 39.
- ⁵⁸ Ove Ditlevsen, *Uncertainty modelling: with applications to multi dimensional civil engineering systems* (New York, 1981); samme forfatter, *Uncertainty and structural reliability: hocus pocus or objective modelling*, serie R, nr. 226 (Lyngby, 1988).
- ⁵⁹ Henrik Stang og Zhang Jun, Fatigue Performance of Fiber Reinforced Concrete: an Experimental and Theoretical Study, *Nordic Concrete Research*, 1996, s. 135 - 36.
- ⁶⁰ *Engineering News Record*, 20. august, 2007.

