

1.2 Betons historie

Af Grethe Pontoppidan, Sanne Spile og Louise Karlskov Skyggebjerg



Figur 1. I 1905 stod Christiani & Nielsen bag Amtmand Hoppes Bro over Gudenåen i Langå. Ligesom andre tidlige jernbetonarbejder var forbilledet tømmerkonstruktioner. Samme år fik firmaet overdraget projekteringen af en 40 meter lang anlægsbro ved cementfabrikken Norden. Amtmand Hoppes Bro er fredet og blev restaureret i 1998. Foto: Keld Abrahamsen.

1.2.1 Indledning

Beton er ikke bare beton. Beton har gennem historien optrådt i forskellige sammensætninger og haft forskellige egenskaber, og beton er blevet anvendt til alle mulige former for varer, byggeri og anlæg. Beton-lignende materialer har eksisteret siden oldtiden, men i 1800-tallet begyndte en udvikling baseret på brug af cement og beton, der har revolutioneret den måde, vi lever og bygger på i hele verden. Beton er i dag det mest brugte byggemateriale.

Danmark er et af de lande, der har taget betonen til sig i stor stil, og beton i Danmark har egenskaber og en kvalitet, der kendetegnes af de danske råstoffer, måden cementen og betonen produceres på, og de krav vi stiller til betonkvaliteten og betonarbejdet.

Beton består overordnet af et bindemiddel også betegnet cement, der sammen med vand danner en "lim", der binder tilslagsmaterialer (sand, grus og sten med varierende kornstørrelser) sammen. Siden midten af 1900-tallet indeholder beton også forskellige tilsætninger og tilsætningsstoffer, hvad man kan læse mere om i betonhåndbogens kapitel 4 om betonsammensætning.

Cement er som nævnt en delkomponent i beton, og betegnelsen har oprindeligt haft betydningen bindemiddel, men over tid er cement blevet synonym med et hydraulisk bindemiddel. Et hydraulisk bindemiddel er kendetegnet ved, at det hærdner med vand og kan hærdne uden tilgang af luft – også fx under vand. Betonens egenskaber afhænger af alle dens forskellige komponenter, og hvordan de bliver sat sammen, men cementen er den bestanddel, som binder betonen sammen. Derfor er cementens og betonens historie uadskillelige.

Beton er ud fra den nutidige betontechnologi defineret ved kornstørrelsen på tilslagsfraktionen, hvor beton og mørtel differentieres ved indholdet af sten (tilslagskorn med kornstørrelse større end 4 mm medfører, at materialet kaldes beton).

En af de danske pionerer inden for betonforskning, Edouard Suenson, skrev i sit værk "Byggematerialer" fra 1911 om beton: "Cementmørtel der ikke bruges til Muring og Pudsning, men til Støbning af Cementvarer eller hele Bygværker, kaldes Beton og indeholder da i Reglen større Sten enten i form af Grus eller som Skærver". Suenson definerede altså materialet beton ud fra fremstillingsmetoden (støbning) og anvendelsen (cementvarer eller hele bygværker) og ikke alene ud fra materialesammensætningen.

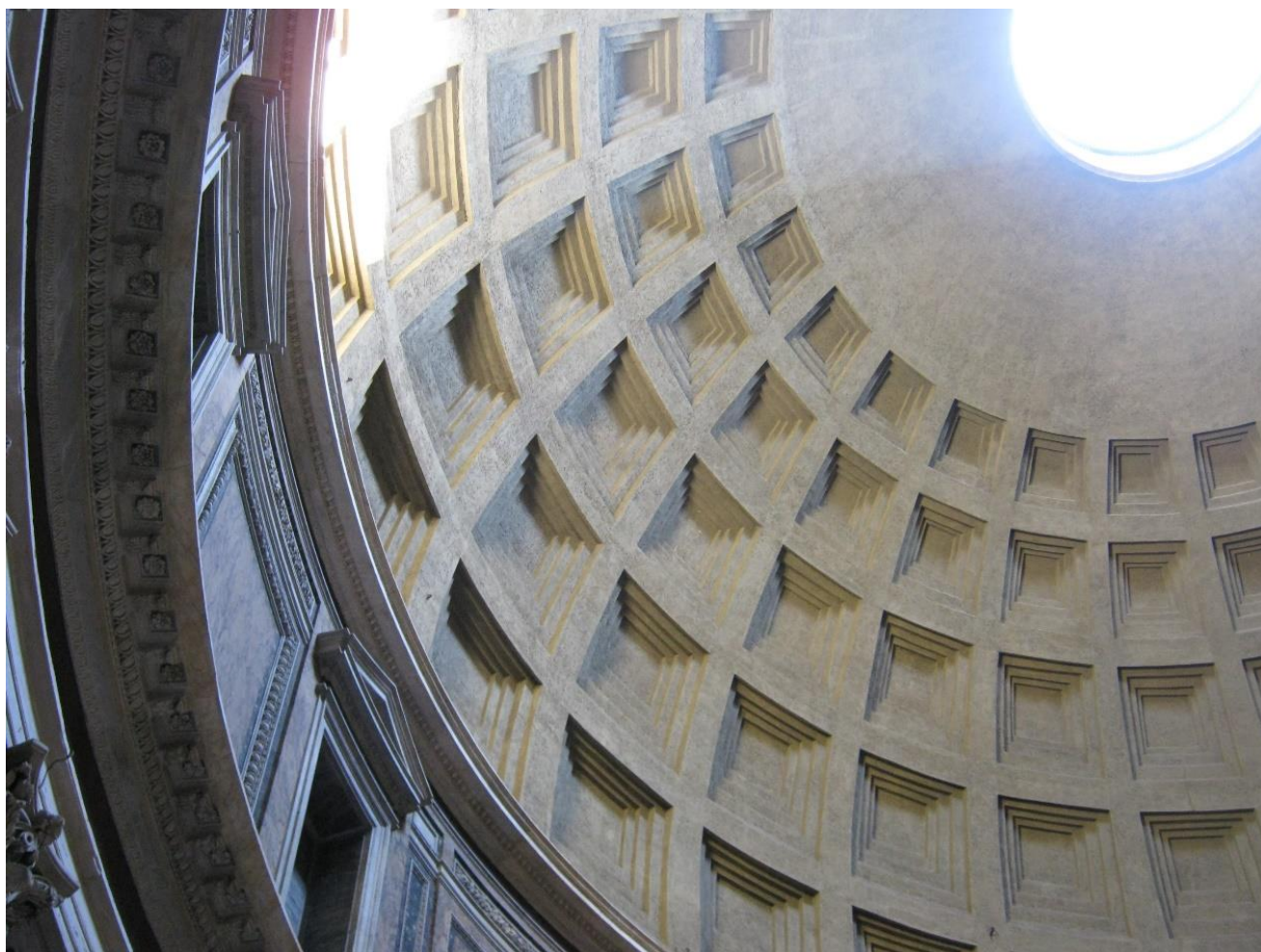
I dette kapitel har vi inddelt betonhistorien i forskellige epoker og beskæftiger os med materialets bestanddele, dets egenskaber, produktion og anvendelse. Vi ser på betonens overordnede historie og på, hvordan beton blev udviklet og anvendt i Danmark. For mere om anvendelsen kan man også se betonhåndbogens kapitel 1.3 om arkitektur.

1.2.2 Romersk beton – beton i oldtiden

De første anvendelser af et hydraulisk bindemiddel, herefter benævnt cement, menes at kunne spores tilbage til den sene bronzealder på Kreta. Her er der fundet særlig anvendelse af et hydraulisk bindemiddel til gulve i vådrum. Det var dog først under det romerske rige, at teknologien blev spredt over det meste af Europa.

Romernes viden om cement blev udbredt gennem romernes praksis og formentlig også kendt gennem skriftlige kilder, hvoraf den mest kendte – og en af de eneste overlevende kilder – er Vitruvius' værk "De Architectura" dateret 20 f.Kr. I værket beskrives det, hvordan vulkansk aske fra byer omkring Vesuv blev tilsat brændt kalk og grus for at skabe et hydraulisk materiale, der kunne hærdne under vand. Med baggrund i netop materialets hydrauliske egenskaber fik det stor anvendelse ved vandbygning som bygning af havne og viadukter, og også til andre konstruktioner som broer og Pantheon (se figur 2) med store spænd.

Vitruvius kaldte askematerialet for et puzzolan efter byen Pozzuoli i Italien, hvor det blev fundet. En benævnelse der stadig anvendes for materialer med lignende egenskaber såsom flyveaske, se betonhåndbogens kapitel 3.5.1 omhandlende flyveaske. Gennem hele oldtiden beroede produktionen af cement på naturlige forekomster af puzzolaner eller af puzzolaner, der var kunstigt frembragt, fx ved at brænde og knuse keramik. Overordnet var de anvendte puzzolaner karakteriseret ved at indeholde kisel, (et mineral af siliciumdioxid), der har været udsat for høje temperaturer.

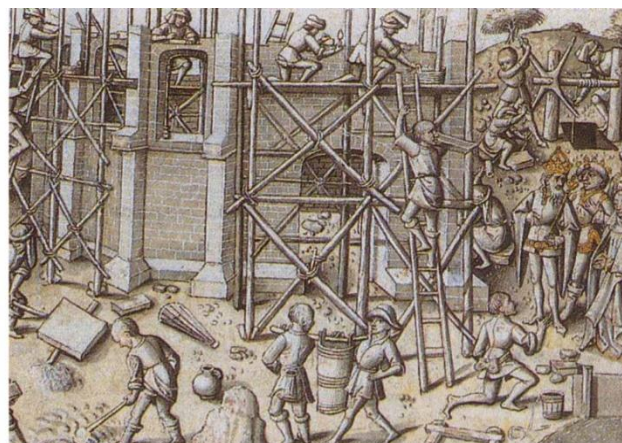
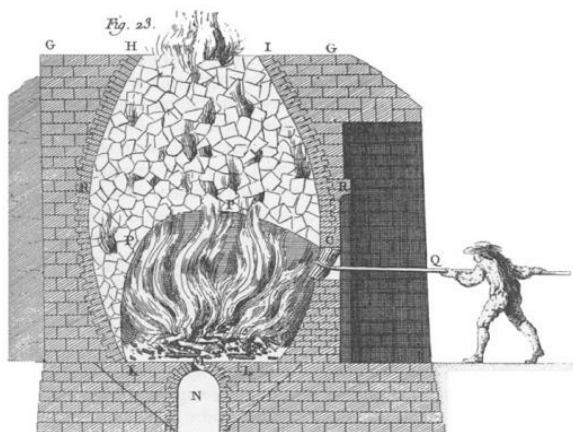
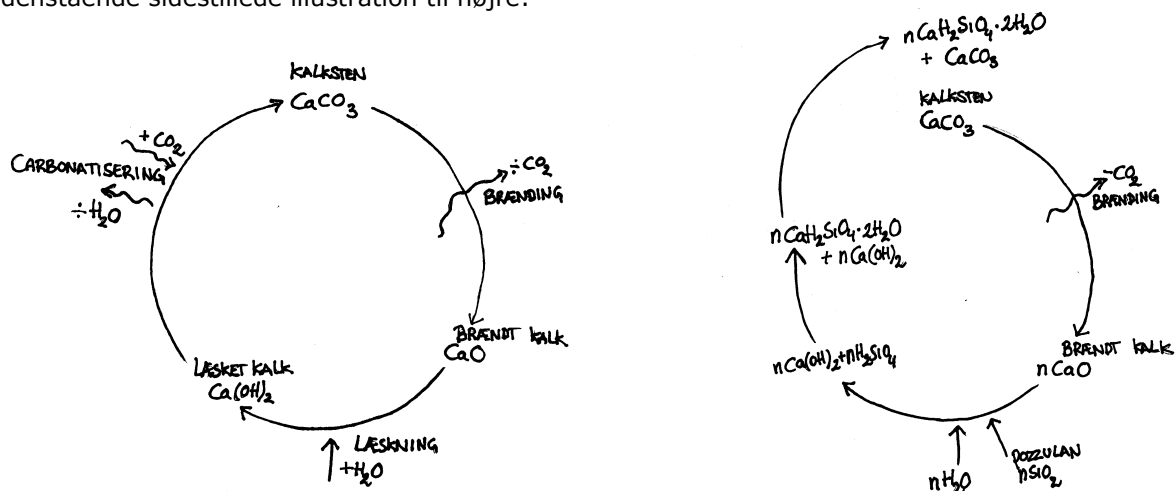


Figur 2. Det mest berømte vidnesbyrd om den tidlige brug af beton er nok den kassetterede kuppel i Pantheon i Rom. Vægten på kuplen er reduceret ved at bruge lettere og lettere tilslag, jo højere der blev bygget samt mindre og tyndere kassetter. Foto: Christian Munch-Petersen.

Hvad er et puzzolan?

Et puzzolan er reaktivt med calciumhydroxid ved tilstedeværelse af vand, så der ved stuetemperatur dannes stoffer med hydrauliske egenskaber.

En lufthærdende kalk hærder med kuldioxid, grafisk illustreret i nedenstående kalkcirkel til venstre i figuren (se i øvrigt betonhåndbogens kapitel 19.2). Ved tilsætning af et puzzolan vil hærdningen ske med vand, se nedenstående sidestillede illustration til højre:



lasko kalk eller blando mærtel. Et som et tao ved stonmuren til den

Figur 3. I den tidlige middelalder blev kalken brændt i jorddækkede brændkamre, men anvendelsen af kalkovne har formentlig hurtigt fundet sted. I kalkovnene blev der fyret med træ. Generelt blev kalken brændt ved omkring 900 °C, men temperaturen kunne i nogle af de anvendte kalkovne stedvis nå op på mere end 1400 °C, hvorved der ved brænding af en ler- eller kiselholdig kalksten blev dannet hydrauliske faser. Efter brænding blev den brændte kalk læsket og/eller knust samt tilsat tilslagsmaterialer. På illustrationen til højre ses det i nederste venstre hjørne, hvordan mørtlen blev blandet på jorden. I middelalderen anvendte man kalksten fra lokale geologiske forekomster. I områder, hvor det ikke var muligt at bryde kalk, anvendtes andre forekomster af kalk, såsom kalkskaller indsamlet på stranden. Til venstre: Illustration af C. Vasschalde. Til højre: Illustration fra Middelaldercentrets nyhedsblad, sommer 2012.

I middelalderen ophørte anvendelsen af den romerske cement næsten helt, fordi den samfundsstruktur, som havde sikret det fælles vidensgrundlag og de tilgængelige råstoffer, forsvandt med Romerrigets fald. I stedet beroede anvendelsen af de hydrauliske bindemidler på lokale forekomster af kalksten med et naturligt indhold af ler og/eller kisel. S sammensætningen af den lokalt brudte kalksten samt de temperaturer, der blev opnået ved brændingen af kalkstenen, afgjorde om bindemidlet havde hydrauliske egenskaber. Hvor der fandtes rene kalksten, blev de anvendt, og hvor de ler- eller kiselholdige kalksten fandtes, blev de anvendt

1.2.3 Romancement i 1700- og 1800-tallet

I forbindelse med byggeriet af fyrtårnet Eddystone ved Plymouth i England i 1750'erne eksperimenterede ingeniøren John Smeaton med at udvikle hydrauliske kalkmørtler fra lokale forekomster af lerholdige kalksten. På dette tidspunkt var alternativet at importere fx trass fra Holland og tilsætte det til den lufthærdende kalk, som ellers ikke var egnet til vandbygninger som fx byggeriet af et fyrtårn.

Smeaton fandt ud af, at han, når han opløste nogle kalksten i salpetersyre, fik en rest af ler. Det kædede han sammen med den af kalkstenene fremstillede mørtels hydrauliske egenskaber, og derved var kimen lagt til at eksperimenter med hydrauliske bindemidler ved at brænde naturlige forekomster af lerholdige kalksten. I modsætning til puzzolanerne skal leren brændes sammen med kalken, før den bliver hydraulisk.

I løbet af de næste 80 år eksperimenterede videnskabsmænd i hele Europa med at forstå og udnytte de hydrauliske bindemidler, blandt andet tog englænderen James Parker i 1796 patent på et hydraulisk bindemiddel, som senere blev navngivet romancement. Det blev opkaldt efter den romerske cement, men blev til forskel fra sin navnebroder ikke blandet med puzzolan, men derimod fremstillet af kalksten med et naturligt højt indhold af ler.

Parkers romancement er derfor en såkaldt naturlig cement. Den fremstilledes ved at brænde uren kalksten, dvs. kalksten med et højt indhold af urenheder i form af ler og/eller kisel. Produktet kunne ikke læskes (som rent CaO , dvs. brændt kalk) og måtte anvendes i findelt form (som cement). Brændingen af den urene kalksten skete i samme type ovn som i middelalderen og ved temperaturer lavere end $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvorfor der ikke skete en sintring af de hydrauliske materialer. Romancementen hærdede hurtigt, men havde også et sent svind.



Figur 4. Skelbro kalkstensbrud ved Limensgade på Bornholm, hvor der tidligt blev brudt uren kalksten til fremstilling af hydraulisk cement. Hammershus på Nordbornholm (bygget i slutningen af 1200-tallet) er formentlig bygget med kalk fra Skelbro, og der arbejdes på at genåbne et af de gamle brud for at kunne få en autentisk mørtel til restaureringsarbejdet på Hammershus. I Danmark findes kun få kalkbrud med urene kalksten. Man har i stedet brugt puzzolaner i form af trass fra Holland og alunskifer fra Sverige til at lave mørtler. Foto og kilde: Niels Holger Larsen / Kulturarvbornholm.dk, hvor man kan finde meget mere information om bornholmsk cement.

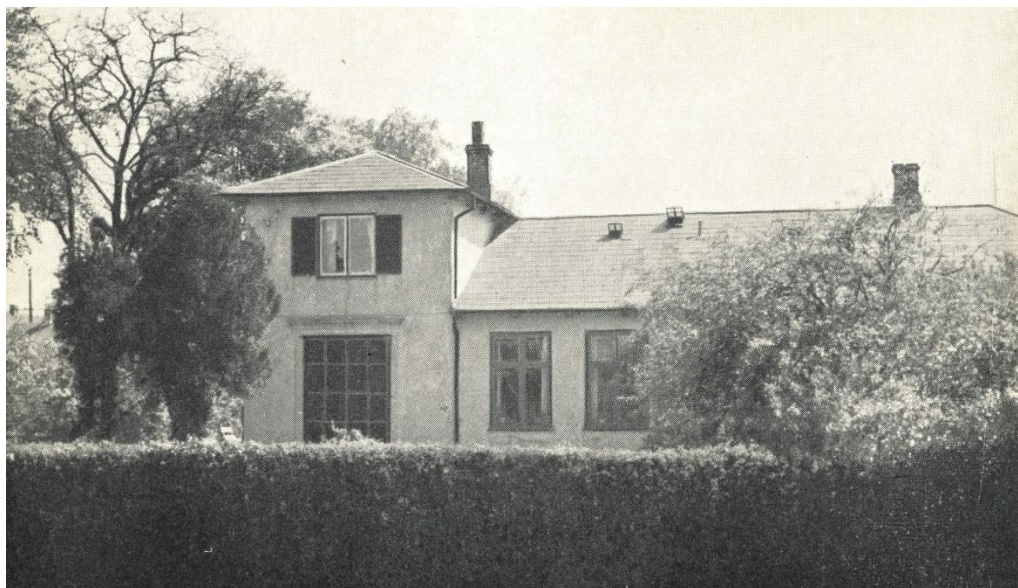
1.2.3.1 Dansk produktion af romancement

I Danmark er kalkstensforekomsterne forholdsvis rene, hvorfor der ikke har været en naturlig tradition for at anvende hydrauliske kalkmørtler. Anvendelsen af et hydraulisk bindemiddel er dog observeret med blandt andet anvendelsen af trass, som angiveligt blev importeret fra Holland fra 1500-tallet og frem.

Forskellige skriftlige kilder, blandt andet Holberg, beskriver derimod produktionen af et hydraulisk bindemiddel på Bornholm, angiveligt så langt tilbage som omkring år 1740, efter at kalkstenens brugbarhed var blevet opdaget af en Major von Schor. Holberg beskriver, hvorledes denne major i 1741 fik privilegium på at brænde cement af kalksten, som blev brudt ved Limensgade på Bornholm. Det skete angiveligt efter at en murermeister Philip Lange havde givet ham en skriftlig attest om, at den bornholmske cement var bedre end den hollandske (formentlig er dette en henvisning til den importerede trass fra Holland). Der findes meget få kilder på denne tidlige produktion, og hvorvidt produktionen blev iværksat, er uvist.

I 1838 blev brændingen ved Limensgade genoptaget af ingeniør P.I. Hammer, og i 1855 fandtes der hele seks cementfabrikker på Bornholm. I de følgende år faldt produktionen, formentlig fordi der dukkede flere københavnske konkurrenter op, heriblandt Fredens Mølle på Amager, der producerede romancement i årene 1846-61 samt Frandsen og Meyers fabrik i København, der blev oprettet i 1863 og producerede frem til 1883.

På sigt blev romancementen udkonkurreret af portlandcement.



Figur 5. Den bornholmske cement blev mest brugt til puds og mørtel, som fx den rødlige puds på Vor Frue Kirke og domhuset i København, men der blev også anvendt romancement fra Frandsen & Meyer til et boligbyggeri i Borup udført i beton i 1866-67 (nedrevet 2018) og på Fjordgårdens lade og villa ved den dengang nye Sidinge dæmning. Det var arkitekten Knud Borring, der stod bag, og han agiterede i det hele taget for brugen af beton, ikke mindst til landbrugsbygninger, hvor betonen ifølge ham også egnede sig til fx kokrybber, svinetrug, val-lebeholdere og gulve. På det tidspunkt havde beton dog et dårligt ry og var blevet forbudt i København, efter at en bygning i Absalonsgade var styrtet sammen. Det skyldtes ifølge Borring ikke materialet, men dårlig udførelse. Foto øverste: Huset i Borup. Fra artikel i Teknik og Beton 1947 nr. 2. Foto nederst: Fjordgårdens lade og i baggrunden boligen som den ser ud i 2020, Grethe Pontoppidan

1.2.4 Portlandcement 1824-1900 – opfindelse og tidlig brug

Den engelske murer Joseph Aspdin fik i 1824 patent på, hvad han kaldte forbedringer i måden at producere kunstig sten på. I patentet kaldte han sin cement for portlandcement, fordi det i farve og styrke lignede kalksten fra øen Portland. Det var dog blandt andet hans søn, William Aspdin, der omkring 1843 modificerede opskriften og fremstillede den første "rigtige" portlandcement, der var væsentlig stærkere end Aspdins oprindelige cement. Også en række andre folk arbejdede med udviklingen af cement i Frankrig og England i løbet af 1800-tallet, bl.a. englænderne C.W. Pasley og I.C. Johnson.

En måde at inddеле de tidlige portlandcementer beror på produktionsmetoden, der i høj grad sætter sit præg på det færdige produkts egenskaber. De kan således opdeles i:

1. proto-portland cement
2. meso-portland cement
3. normal-portland cement

Proto-portland cement er den tidlige cement opfundet af Joseph Aspdin. Den har et meget lavt indhold af klinkerminerale (CS-faser), fordi blandingen af råstoffer ikke er blevet brændt ved en tilstrækkelig høj temperatur.

Meso-portland cement er karakteriseret ved et højere indhold af klinkerminerale, deriblandt et højt indhold af belit (C_2S). Opfindelsen tilskrives William Aspdin og I.C. Johnson.

Normal-portland cement, som vi kender den nu, indeholder klinkerminerale alit (C_3S), belit (C_2S), aluminat (C_3A) og ferrit (C_4AF).

Portlandcementen adskiller sig fra de tidligere cementtyper ved, at leren ikke kommer fra den urene kalk, men kunstigt sammensættes med den rene kalk i et bestemt blandingsforhold inden brænding, og ved at blandingen brændes ved en høj temperatur over 1000 °C indtil sintring (dvs. at kalk og ler smelter lidt sammen). Derved dannes de såkaldte klinkerminerale. Fordi den brændte blanding ikke er naturligt forekommende, er portlandcement altså en såkaldt kunstig cement.

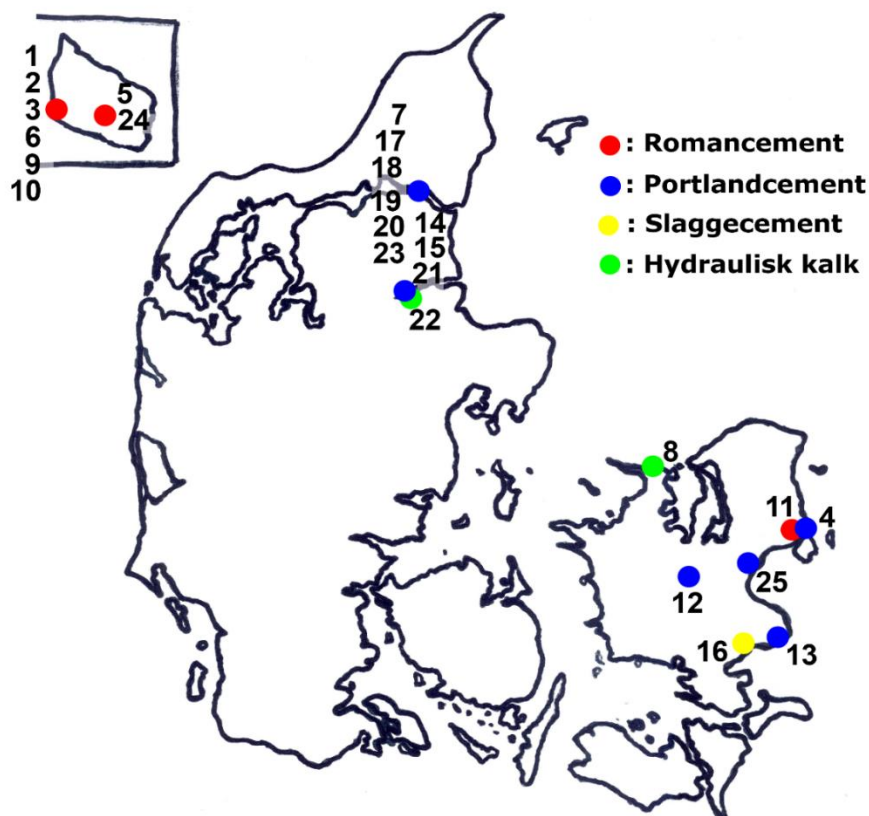
1.2.4.1 Etablering af portlandcementindustrien i Danmark

Kilder beskriver, at der efter opfindelsen af portlandcement blev importeret cement fra England til Danmark. Fabrikken Johnson Cement skulle have haft et godt renommé, men importen led under konkurrenters misbrug af deres "elefantmærke".



Figur 6. Den engelske cementproducent I.C. Johnsons elefantmærke.

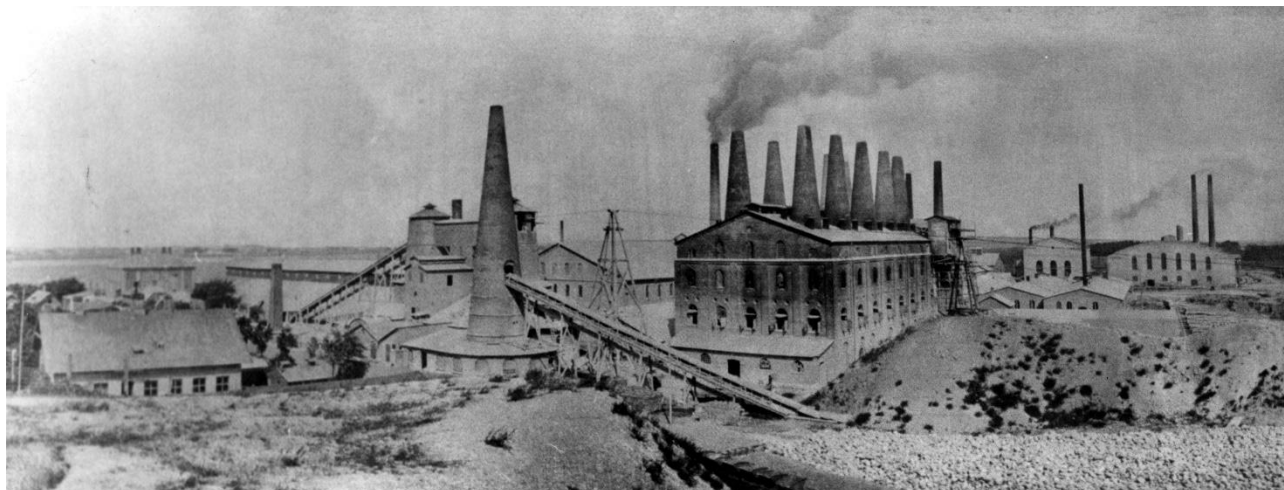
Grundet problemer med kvaliteten af cementen fra England erstattedes den i Danmark af import fra Tyskland, der i 1855 fik sin første portlandcementfabrik i Stettin. Den danske produktion startede omkring 1861, hvor Fredens Mølle på Amager begyndte at producere portlandcement, efter i nogle år at have produceret romancement. Derefter fulgte fabrikken Hertha i Ringsted (1868) og Rødvig Portland Cementfabrik (1870). Ingen af disse fabrikationer fik dog en lang levetid.



Figur 7. Danmarkskort med placering af fabrikker, der starter produktion af et hydraulisk binde-middel i årene fra 1840 til 1958. Især starttidspunktet er usikkert fastlagt. Placeringerne er overvejende bestemt af tilgængeligheden af råstoffer.

- | | |
|--|---|
| 1. A/S Limensgade Cementfabrik: 1841-50. | 14. Cimbria: 1873-1919. |
| 2. Phønix: 1842-1923. | 15. Dania: 1887-1984. |
| 3. Lykkens prøve: 1846-1900. | 16. Gefion: 1888-90. |
| 4. Fredens mølle: 1846-68. | 17. Aalborg Portland: 1891- |
| 5. Borggaard: 1847-1910. | 18. Danmark: 1898-1979. |
| 6. Haabet: 1849-1900. | 19. Norden: 1901-32. |
| 7. Wangsminde: 1854-64. | 20. Nørresundby: 1907-32. |
| 8. Klintebjerg: Før (?) 1840-1957. | 21. Kongsdal 1908-33. |
| 9. Saga: 1856-1900. | 22. Cheops Kalk 1910-ca. 50. |
| 10. Godthaab: 1857-1900. | 23. Dansk Andels Cementfabrik: 1911-74. |
| 11. Frandsen & Meyer: 1863-90. | 24. Bornholms Cementfabrik: 1919-21. |
| 12. Hertha: 1868-90. | 25. Cementfabrikken Karlstrup: 1958-75. |
| 13. Rødvig: 1870-90. | |

I 1873 blev cementfabrikken Cimbria grundlagt ved Mariager Fjord, og i 1887 fulgte Dania samme sted. I 1891 blev fabrikken Aalborg Portland (også kaldet Rørdal) taget i brug ved Limfjorden, den hidtil største fabrik, og ved Limfjorden kom også Danmark (1898), Norden (1901) og Nørresundby (ejet af ØK) (1907) til at ligge. Disse fabrikker blev placeret ved brud med flintfattigt skrivekridt, hvor der også var let adgang til det andet råstof, ler. Med baggrund heri kom den danske cementindustri hurtigt til at eksportere portlandcement til en lang række lande.



Figur 8. Aalborg Portland som fabrikken så ud omkring 1890. Den var et større industrianlæg, opført ved siden af et kalkbrud og ved vandet, hvor der var gode transportmuligheder med store skibe. På fotoet ses de store skaktovne, hvori ler og kalk efter blanding blev brændt til cementklinker. Skaktovnene blev senere erstattet med en vigtig nyskabelse: roterovnen. Roterovnen var patenteret i Storbritannien i 1877, hvor man dog ikke havde fået den i drift. Det havde man til gengæld i USA, hvor en af mændene bag FLS så den i 1898. Herefter købte han to roterovne til Aalborg Portland, hvilket gav enorme forbedringer i forhold til de gamle skaktovne, fx ved optimering af brændingstid, ingen ventetid og et mere ensartet produkt. Produktionen steg, og ikke helt uden grund kunne FLS i 1903 annoncere med, at de fuldstændigt havde reformeret verdens cementindustri. Foto: Aalborg Stadsarkiv. Fotograf ukendt.

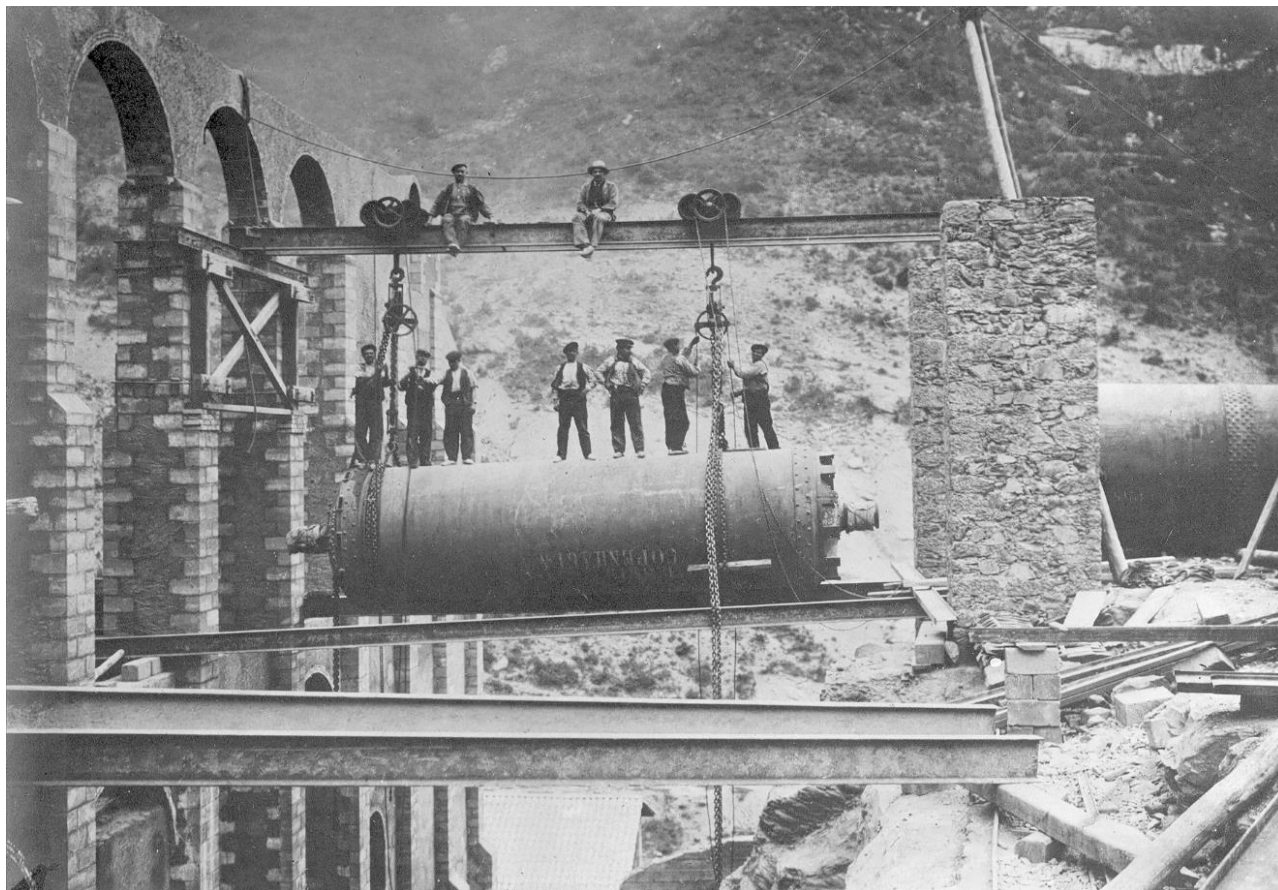
I 1888 fik F. L. Smidth & Co. (FLS) sin første cementfabrik i Limhamn i Skåne, og året efter tog man initiativ til at etablere Aalborg Portland. Her havde man mulighed for at eksperimentere med produktionsanlægget og fremvise det for potentielle købere.

FLS var etableret i 1882 og blev med tiden den dominerende danske cementproducent. FLS og Aalborg Portland blev skilt fra hinanden i begyndelsen af nullerne, men FLS har stadig meget stor succes som eksportør af teknologi til fremstilling af cementfabrikker.

Den store succes skyldtes bl.a., at FLS bidrog til at udvikle en ny måde at fremstille cement på. Oprindeligt blev råmaterialerne blandet i vand i en slæmme, hvorefter blandingen bundfældede, blev skåret ud i blokke og efter tørring brændt. Brændingen foregik i skaktovne, hvorefter de brændte klinker blev knust og formalet til pulver i valse- og mølleanlæg.

Alt sammen langsommeligt og hårdt arbejde, indtil der i 1880'erne begyndte at dukke nye teknologier op. Her bidrog FLS fx med at videreudvikle rørmøllen, efter at de havde købt den danske ingeniør L.M. Davidsens patent fra 1892. Cementmøllerne blev eksporteret til hele verden.

I 1913 havde firmaet solgt over 3.000 rørmøller, der malede brændt cement til pulver, og efter 2. verdenskrig havde man leveret maskiner og anlæg med en kapacitet svarende til halvdelen af hele klodens cementproduktion.



Figur 9. F.L. Smidths rørmølle B40 sættes op i Aslan. År ukendt. Foto fra F. L. Smidts arkiv.

1.2.4.2 Anvendelsen af portlandcement



Figur 10. I en artikel fra 1867 blev det fortalt om portlandcement, at den blev brugt til "Støbning, som Bindemiddel ved Murarbejde og sammes Afpudsning, samt til Beton". Som det hed, blev den ikke kun brugt til arkitektoniske prydelser, monumenter, vaser o.l., men også til genstande, der tidligere var blevet fremstillet i jern eller sten som trapper, krybber, vandledningsrør og fliser. Cementen, der blev anvendt ved disse tidlige dekorationselementer, var så grov, at det ikke var nødvendigt at anvende et tilslag. Cementen fungerede både som tilslag og bindemiddel. Illustrationen stammer fra katalog på DTU Bibliotek.



Figur 11. Helt tilbage fra betonens barndom har begrebsbrugen været lidt forvirrende, når man snakker om beton, mørtel og cement. Mange betonvarer er nemlig slet ikke ud fra den moderne betonteknologiske forståelse lavet af beton, men af cementmørtel uden sten i tilslaget. Det gælder fx betonrør som dem på fotografiet. Fotografiet er fra Odense i 1947. Foto: Eduard Christoffersen / Odense Stadsarkiv.

Portlandcement blev i starten bl.a. brugt til kasematter, kanonstillinger og kajanlæg ved opførelsen af fortet Prøvestenen, der blev bygget fra 1858 til 1863, og i forbindelse

med byggeriet af hele Københavns befæstning blev en række romancementer og portlandcementer fra danske og tyske fabrikker undersøgt nærmere. Beton blev også brugt til krudtkamrene på Dybbøl (mod tidligere tømmerstokke), og deres modstandsevne mod de fjendtlige granater var en af årsagerne til, at Dybbøl holdt stand så længe. Krudtkamrene blev senere sprængt af preusserne, men betonen er stadig den dag i dag i god stand.

Med fæstningsbyggerierne blev den danske viden om beton udvidet, præcis ligesom det skete over 100 år senere, da byggeriet af Storebæltsforbindelsen satte gang i en fornyet interesse for - og forskning i - beton.

Portlandcement blev også anvendt til fundamentet ved bygningen af Nationalbanken i 1866, ved anlægget af Esbjerg havn og til kystsikring på Jyllands vestkyst i 1870'erne. Beton var et vigtigt materiale inden for vandbygning pga. vandtætheden, da man så ikke behøvede at tørlægge arbejdsstedet.

I 1891 estimerede man det nationale forbrug af portlandcement til at ligge mellem 200.000 og 300.000 tønder, hvoraf en stor del blev brugt til betonen på fæstningsanlæggene. Sammenholdes dette med den årlige produktion af 9.000.000 tønder portlandcement på Tysklands daværende 69 cementfabrikker, bliver det tydeligt, at portlandcement allerede på dette tidspunkt var et vigtigt og meget anvendt byggemateriale i Europa.



Fig. 5. Scene fra københavnsk byggeplads anno 1933. Det må indrømmes: motivet var svært at finde. For få år siden kunne billedet fås på den nærmeste byggeplads.

Figur 12. Selv om betonblandemaskinen og hydrauliske stampere var i brug allerede omkring 1900, var betonarbejdet stadig hårdt fysisk arbejde. Da Vestvolden blev bygget i 1888-92 måtte betonen håndblandes, og den skulle stemples med hånden til den begyndte at udskille vand. Foto til venstre: Arbejdermuseet. Foto til højre: Fra B.J. Rambøll. (1955). Rationelt byggeri.

1.2.4.3 Prøvninger og udvikling af kvalitetskrav til portlandcement i Danmark

Med afsæt i en forudgående omfattende prøvning af portlandcement i hovedsageligt England, Tyskland og Frankrig vedtog Den tekniske Forening i 1878 de første danske bestemmelser for ensartet levering og undersøgelse af portlandcement.

Den første bestemmelse var, at cementen blev modtaget og betalt efter vægt, mens næste bestemmelse handlede om, at man, hvor særlige hensyn ikke gjorde sig gældende, burde foretrække langsomt størknende cement. De øvrige bestemmelser handlede om, at cementen ikke måtte bulne ud, at den skulle være fint malet, og at den skulle underlægges en praktisk styrkeprøve.

Den tekniske Forening var grundlagt i 1877 med det formål at fremme udbredelsen af tekniske kundskaber ved møder og ved udgivelsen af et tidsskrift. I den allerførste udgave bragte tidsskriftet en længere artikel om cementundersøgelser skrevet af premierløjtnant A.F. Andersen fra Ingeniørkorpset. (Ingeniørkorpset stod senere for anlægget af Vestvolden, hvor man gjorde sig mange nye erfaringer med beton).

Den blev fulgt op af en diskussion på et møde, hvor Andersen anbefalede, at man vedtog en bestemt fremgangsmåde for cementundersøgelser, og at foreningen skulle arbejde for det formål. Det ville man gerne, og det blev altså en realitet allerede året efter.

I perioden blev der foretaget en række cementundersøgelser af såvel danske som udenlandske importerede cementer i Steins Laboratorium, hvor man især havde undersøgt størkningstid, tegn på udbulning (volumenbestandighed, fordi calciumoxid vil læske – blande sig – med tilstedeværende vand, hvorved der kan ske en volumenudvidelse i mørtlen eller betonen), finhed ved sigtning og styrkeprøve ved sønderrivning.

De prøvningsmetoder, man benyttede hos Stein, adskilte sig fra tidligere tiders mere praksis- og erfaringsbaserede måder at bedømme cementens kvalitet på. I en artikel fra 1867 blev det fx fortalt, at praktikere ofte bedømte en cements kvalitet dels på farven, dels ved at smage og føle på den.

God portlandcement skulle have en mild, ikke ætsende smag, fordi det betød, at den ikke indeholdt et stort overskud af brændt kalk. Når man gned den mellem fingrene, skulle den have en vis skarphed, fordi skarpheden antydte en "lagdeling af de krystallinske blade". Allerede på det tidspunkt var man dog også interesseret i at bedømme styrken ved knusnings- og rivningsforsøg, og artiklen var illustreret med tegninger af prøveapparater.

1.2.5 Jernbeton ca. 1850-1908 – opfindelse og tidlig brug

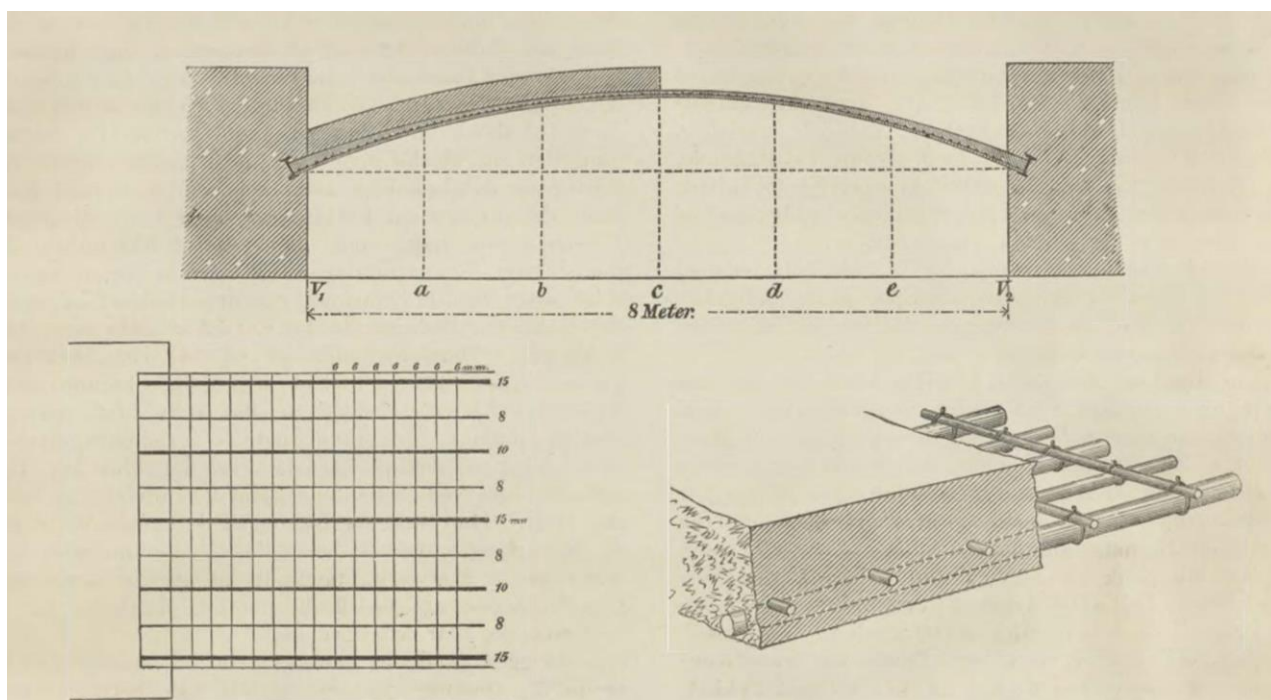
En af de ting, der for alvor satte skub i brugen af beton, var opfindelsen af jernbeton. Jernbeton eller armeret beton er beton, hvis trækstyrke er forøget ved indstøbte jern.

1.2.5.1 Monier- og Hennebique-konstruktioner

Den franske gartner Monier, der støbte plantebaljer i cementmørtel med indlagt jern, var ikke den første, der forsøgte sig med at indstøbe jern i beton, men han var den første, der tog patent på ideen, og hans arbejde og patent fra 1867 kom til at præge udviklingen. Patentet omhandlede i første omgang transportable beholdere, men blev i 1875 udvidet til at omfatte rør og reservoirer, broer, trapper og jernbanesveller.

En tysk ingeniør Gustav Adolf Wayss havde set Moniers konstruktioner på en udstilling og købte hans patent, og det blev derefter Wayss, der kom til at videreudvikle Moniers idé. Wayss lavede belastningsforsøg og arbejdede med placeringen af jernet i betonen og med statiske beregninger. I 1887 udgav han en længere brochure om Monier-konstruktioner og sine forsøg. Den fik stor betydning for brugen af jernbeton, ikke mindst i Tyskland.

I oktober 1891 holdt arkitekten Emanuel Jensen et foredrag i Den tekniske Forening om Monier-konstruktioner. Han fortalte her, at Monier-systemet først var blevet brugt til vandbassiner, men siden også havde fået betydning i husbygning som etageadskillelse, skillerum, ydervægge, trapper, tagkonstruktioner og endda hele huse. Staldbygninger, fabriksbygninger, lagerbygninger, fæstninger og sågar kirkehvelvinger blev nævnt af Jensen.

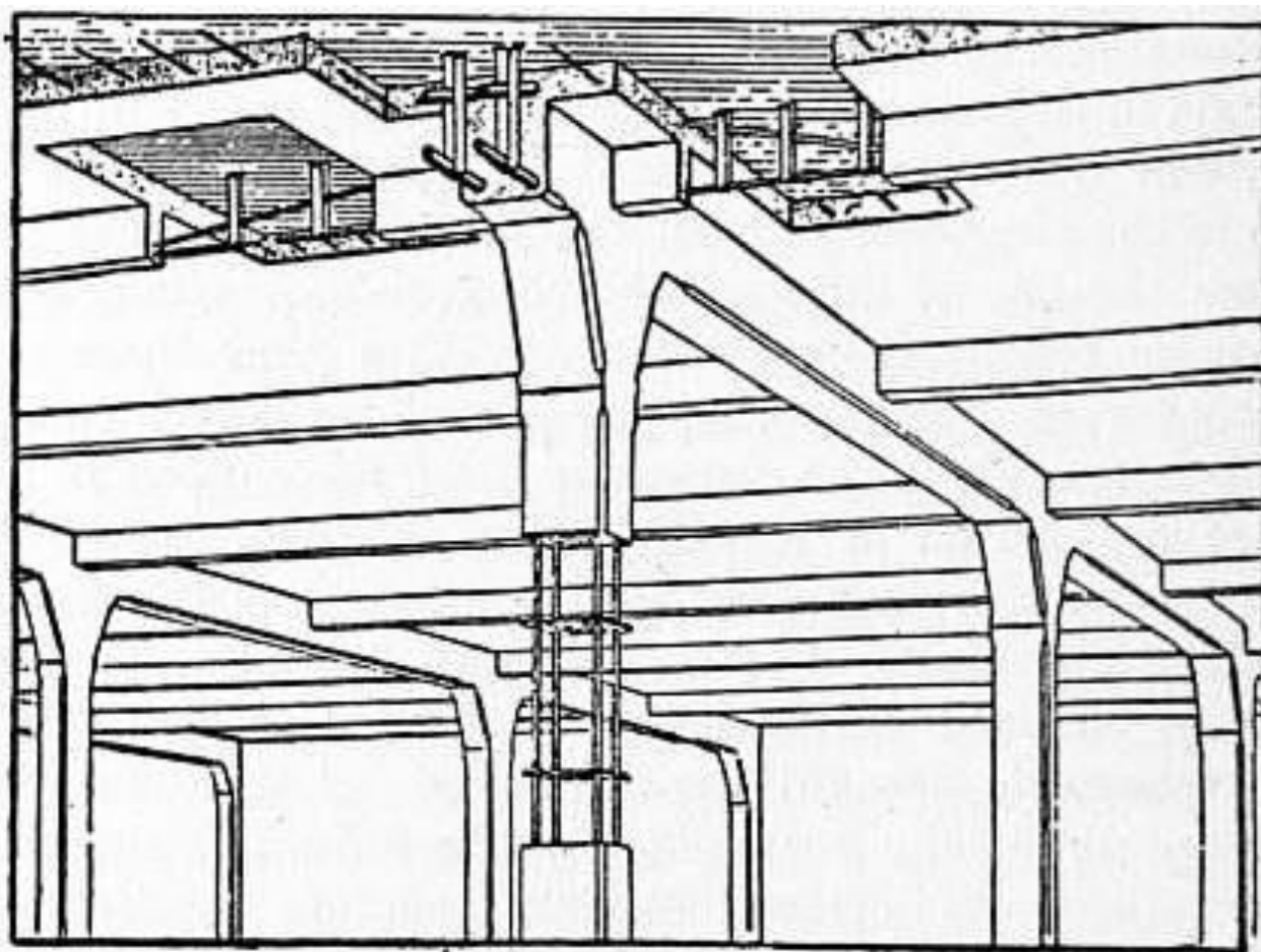


Figur 13. Moniers system, som Jensen præsenterede det i 1891. En Monier-konstruktion består grundlæggende af et jernskelet indstøbt i cementmørtel. Som Jensen forklarede i 1891, så består Monier-konstruktioner af "et eller flere Lag Jærnstænger af Tykkelse, som Bæreevnen nødvendiggør det, der da indstøbes i Cementmørtel af Blanding i Reglen 1:3. Jernskelettet udføres først paa selve Byggepladsen, idet man her paa en Bræddeforskalling af den for konstruktionen ønskede Form først henlægger et Lag tykkere Jærnstænger, saakaldte Bærestænger, vinkelret paa Konstruktionens Vederlag, der da sammenbindes med en Række tyndere Trykfordelingsstænger parallelle med Konstruktionens Vederlag. Tykkelsen og Mængden af Bærestængerne findes for

hver konstruktion ved en statisk Beregning, saa vel som Tykkelsen af det omgivende Cementlag. Fordelingstængerne have kun i Funktion at fordele Trykket paa Bærestængerne og tages derfor ikke med i Beregningen". Det smarte var, at jernet blev lagt ind i cementen, hvor trækspændingen opstår, så man opnåede både trækstyrke fra jernet og trykstyrke fra betonen. Af fordele ved systemet fremhævede Jensen bl.a. brandsikkerhed og konstruktionernes lethed. Illustration: Den tekniske Forenings Tidsskrift på Ingeniørens Danmarkshistorie (ing.dk/danmarkshistorie).

Ved anlæggelsen af Frihavnen (1891-94) brugte man også Monier-konstruktioner i forbindelse med bølgebrydere, ligesom Jensen omtalte Monier-fliser, rørledninger for vandforsyning, kloakledninger, brønde osv. Den dristigste anvendelse på det tidspunkt var ifølge ham til broer, bl.a. i forbindelse med konstruktion af jernbanebroer i Østrig.

Jensen var repræsentant for det tyske selskab Aktiengesellschaft für Beton- und Monierbau, der netop i 1891 oprettede en filial i Danmark. Her arbejdede man først med vægge og loftshvælvinger i et vaskeri på Skt. Hans Hospital og derefter med de hvælvede lofter i Statens Museum for Kunst. Derefter gik det slag i slag med forskellige jernbetonkonstruktioner, og i 1893 begyndte man også at fabrikere monierrør. I 1897 blev filialen overtaget af firmaet Em. Jensen & H. Schumacher, der sammen med firmaet Schøller & Rothe repræsenterede arbejdet med jernbeton i Danmark indtil århundredeskiftet, hvor den franske ingeniør François Hennebique lod sig repræsentere i Danmark ved ingeniørkaptajn Torben Grut og murermester Schiøtz. Grut havde lavet betontrækforsøg og kom bl.a. til at konstruere en stor vandbeholder med hvælvet bund for Randers Kommune, kulbroen på Valby Gasværk og Tietgensgadeviadukten. Firmaet rammede også den første betonpæl i Danmark.



Figur 14. Principtegning af Hennebiques system. I en længere artikel i *Ingeniøren* i 1900 forklarede Grut de nye franske Hennebique konstruktioner, og hvordan de adskiller sig fra Monier konstruktionerne: "I Husbygning anvendes Hennebique-Konstruktionerne – ligesom Monierkonstruktionerne – hovedsagelig til Etageadskillelser, men medens Monierkonstruktionerne ere hvælvede, anvender Hennebique med meget faa Undtagelser flade Lofter [...] Hvad først Pladerne angaar, da ere de – efter Spændvidden og Belastningen – fra 8-16 cm. tykke. Jeg maa her indskyde den Bemærkning, at Udtrykket "Plader" maaske kunne give de Herrer den Tro, at de blive lavede i en Fabrik eller et Værksted og henlagte paa deres Plads. Det er imidlertid ikke Tilfældet. De blive støbte paa deres Plads i Konstruktionen og sammen med de armerede Beton-Bjælker, saa at det hele danner én sammenhængende Masse, en Monolith". Grut forklarede også armeringens placering i betonpladen og understregede, at de overalt, hvor det er muligt, var indspændte. Det var en afgørende forskel i forhold til traditionelle konstruktionsprincipper. Kilde: *Ingeniøren på Ingeniørens Danmarkshistorie* (ing.dk/danmarkshistorie).

Hennebiques-konstruktioner fik ligesom Moniers stor betydning i Danmark, hvor Grut, nyligt hjemkommet fra Paris, præsenterede tankegangen ved et foredrag i år 1900.

Ifølge Grut arbejdede Hennebique ikke kun med etageadskillelser, men støbte også fx søjler, tage og funderinger efter systemet. Det var også blevet anvendt ved støbningen af en kajmur i Southampton, men på det punkt var Grut nu skeptisk. For hvorvidt armeret beton ville vise sig at være et heldigt materiale at benytte i søvand, måtte fremtiden vise. De hidtidige erfaringer tydede ifølge Grut på, at saltvandet inden længe ville ødelægge betonen, og så ville jernet også gå til.

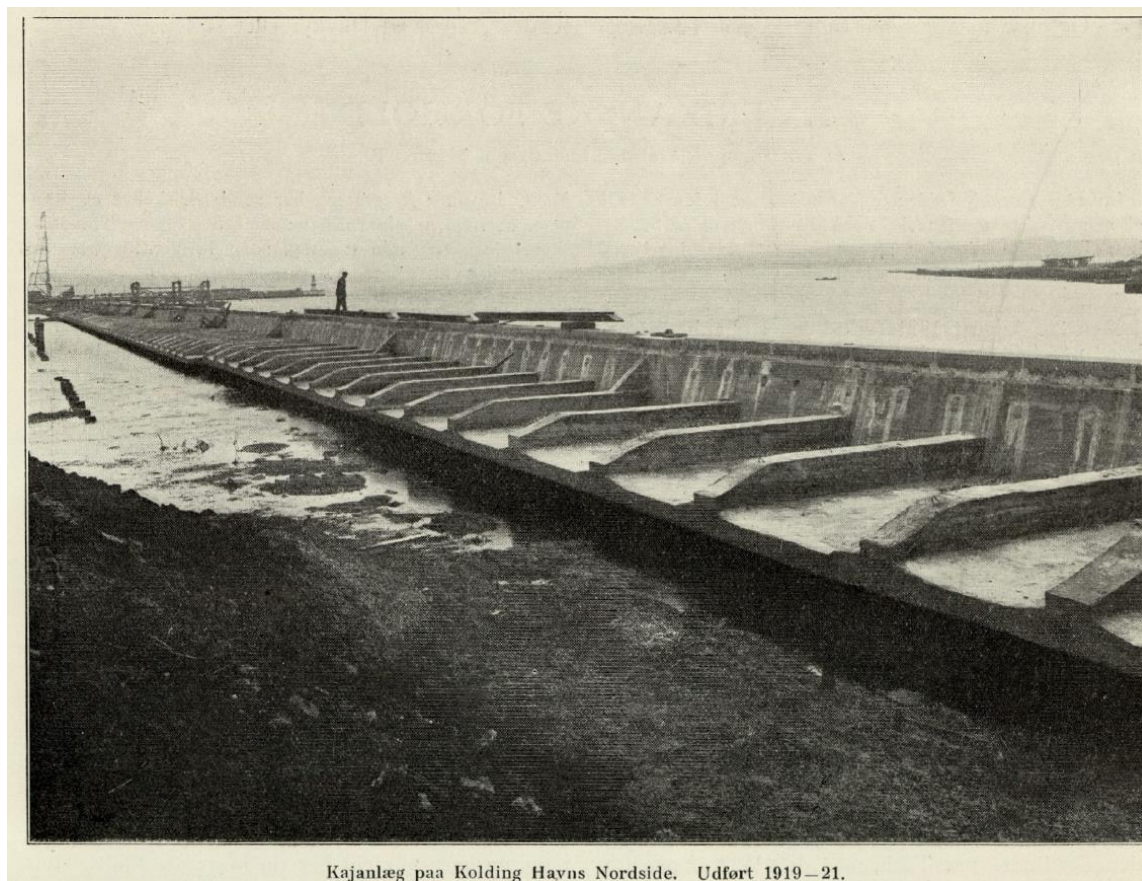
Grut sluttede sit foredrag af med at sige, at der så at sige ikke var det felt af ingeniørvirksomheder, hvor den armerede beton ikke havde været anvendt med held: til broer, siloer, kalkovne, vandeservoirs, trykvandsledninger osv.

Med jernbetonen fik man helt nye konstruktionsprincipper, som kunne mere, men også var mere komplicerede at forstå. Det var med til skabe et behov for ingeniører, som kunne udregne konstruktionerne på forhånd. I 1906-07 holdt ingeniøren Edouard Suenson på Polyteknisk Lærestalt (i dag DTU) den første forelæsningsrække i Danmark over jernbeton. I 1907 udgav han den første lærebog, og fra 1910 blev jernbeton et obligatorisk fag for bygningsingeniører. Dermed var de første skridt taget til at uddanne konstruktionsingeniørerne til den nye og centrale rolle, de fik i det 20. århundredes byggeri.

1.2.5.2 Tidlig brug af jernbeton i Danmark

Brugen af jernbeton gav nye muligheder i forhold til uarmeret beton. Som Suenson skrev i 1911, så havde betonens anvendelse tidligere pga. dens ringe trækstyrke været indskrænket til konstruktioner, der ikke er påvirkede af trækspændinger, men nu kunne man også lave konstruktioner med bøjningsspændinger. Den armerede beton kunne bruges til søjler, vægge, tage og hele bygninger, mens den uarmerede betons anvendelse i husbygning hovedsagelig havde været indskrænket til fundamenter, kælder-gulve, gulvfliser og hvælvinger mellem jerndragere.

Som nævnt blev der benyttet jernbeton i Danmark fra omkring 1891, og i 1894 fulgte en fodgængerbro med 19 meters spændvidde ved Gefionspringvandet. Der opstod også firmaer, der var specialiseret i arbejdet med jernbeton. Et tidligt eksempel er Christiani & Nielsen grundlagt i 1904. Firmaet skulle arbejde med projektering og udførelse af konstruktioner af jernbeton på et tidspunkt, hvor det endnu kunne være svært at overbevise bygherrer om, at det kunne være en god idé at bruge materialet. Rudolf Christiani havde været et par år hos Hennebique i Paris og hos dennes repræsentant i Düsseldorf og der "gjort sig fortrolig med nogle ejendommelige Konstruktioner, der udførtes af Beton armeret med Rundjern", som det senere blev formuleret i et jubilæumsskrift. Med tiden blev firmaet internationalt førende inden for konstruktionen af kajmure bestående af rammede spunsvægge og pæle af jernbeton. Det system afprøvede de første gang i Assens i 1906 og dernæst i Randers i 1907. Christiani & Nielsens kaj i Assens findes stadig - det går for at være verdens første bolværk helt i jernbeton.



Figur 15. Det moderne jernbeton bolværk i Kolding Havn fra 1919 -1923, inden det er opfyldt med jord. Foto fra Ingeniøren august 1923.

Christiani & Nielsen fik en række udenlandske datterselskaber og blev i øvrigt langt fra det eneste danske firma, der kom til at arbejde med jernbeton, nationalt såvel som internationalt. Senere fulgte bl.a. Kampsax (1917), der blev kendt for infrastrukturarbejder som den Trans-iranske Jernbane, Højgaard & Schultz (1918), der som det første byggede et jernbetonskib, samt Monberg & Thorsen (1919), der løftede de store broopgaver som Lillebæltsbroen og senere deltog i Storebæltstunnelen og Øresundsforbindelsen. Internationalt blev den danske ingeniørkaptajn F. Møhl også anerkendt som ekspert mht. skorstensbygning.

1.2.6 Udvikling af jernbetonen i Danmark 1908-1950

Ingeniører og entreprenører var hurtige til at tage jernbetonen til sig, og i begyndelsen af 1900-tallet var de vigtigste institutioner for udvikling af jernbetonen på plads, og udforskningen eksploderede. I Danmark fulgte man godt med i den internationale udvikling, og danske ingeniører bidrog også til den internationale udvikling. Blandt andet inden for statik, hvor ingeniøren Asger Skovgaard Ostenfeld, der bl.a. projekterede Gefionbroen og Langeliniebroen, bidrog med vigtig ny viden.

1.2.6.1 Kvalitetssikring og udvikling af betonen

Ifølge Suenson var det i 1911 blevet en selvfølge, at man mente cementbeton, når man bare sagde beton, altså beton fremstillet ved en blanding af vand, sten og portlandcement. Portlandcement havde med andre ord fortrængt andre bindemidler ved betonfremstilling i en sådan grad, at det ikke længere var nødvendigt at snakke om cementbeton til forskel fra tjærebeton, kalkbeton, gipsbeton osv. 20 år senere beskrev han, hvordan læren om betons rette sammenhæng var svulmet op til en hel videnskab.

En af de ting, der efterhånden kom i fokus, var vand/cement-forholdet (vedr. v/c-forholdet, se betonhåndbogens kapitel 2.0 om krav til beton), men hvordan det skulle være, var der ikke helt enighed om. Suenson skelnede i 1911 i en lærebog mellem tør mørtel, jordfugtig beton, plastisk beton og våd beton. Han skrev, at der var nogenlunde enighed om, at den våde beton skulle anvendes overalt, hvor der ikke blev stampet, og at jernbetonkonstruktioner krævede en beton på overgangen mellem den plastiske og våde, da man ellers ikke ville få jernet godt omstøbt. Striden stod om, hvorvidt man ved almindelige betonarbejder skulle foretrække plastisk eller jordfugtig beton, fordi nogle fagmænd hævdede, at den sidste blev stærkere. Suenson anbefalede i øvrigt, at man prøvede sig frem til den rigtige vandtilsætning, også selv om det betød, at man måtte finde sig i, at de første blandinger blev mere eller mindre mangelfulde.



Foto 16. Billedet viser bakkegrus fra Hedehusene, som Suenson undersøgte i 1910 for at finde ud af, om grusets naturlige kornkurve var passende for dets anvendelse til beton, og om man ved at ændre på kornkurven kunne øge betonens styrke. En grusprøves kornkurve fortæller, hvorvidt gruset består af sorteret materiale med ensartet kornstørrelse, eller om der i stedet er en jævn fordeling af partikler med forskellig størrelse, hvilket muliggør en tættere pakning. God beton afhænger ikke kun af cementen, men også af pakningen af tilslaget. Foto: Teknologihistorie DTU.

Suenson selv lagde stor vægt på udførelsen af betonarbejderne. Ifølge ham afhang et jernbetonværks kvalitet nemlig ikke mindre af udførelsen end af styrkeberegningerne. Mht. brudsikkerhed mente han fx, at et godt arbejde og høje spændinger var at foretrække frem for dårligt arbejde og lave spændinger. Sikkerhed mod gale mål, skæve linjer, rustsprængninger og andre dårligdomme fik man ifølge Suenson kun ved at overvåge udførelsen.

1.2.6.2 *Betonen standardiseres*

I 1905 begyndte et udvalg under Dansk Ingeniørforening (DIF) at arbejde på den første danske norm for jernbetonkonstruktioner, og DIF nr. 7 Normer for Jærnbeton-konstruktioner udkom i 1908. Det var et lille hæfte, som beskrev, hvordan jernbeton til husbygning skulle projekteres og håndteres på byggepladsen. I 1926 blev normerne suppleret med en særskilt norm for vandbygning, og i 1931 fulgte en norm for jernbetonskorstene.

DIF's jernbetonnormer blev opdateret i takt med, at branchen gjorde sig nye erfaringer. I 1921 udkom den 2. revision, samtidig med at der blev etableret et interskandinavisk samarbejde for ensartede jernbetonnormer. I 1926 stillede DIF for første gang krav til dæklagets tykkelse, der skulle være 2-5 cm, mens en revision fra 1943 fx lempede på kravet til v/c-forholdet og dermed imødekom materialemanglen under krigen. I 1949 blev DIF's normer for betonkonstruktioner samlet og publiceret som en formel national dansk standard.

DIF udgav også supplerende særlige normer og vejledninger for fx Portlandcement (1911), normalmål for Betonjærn (1923), Betonrør (1920), Cementvarer (1926) og Betonvarer (1941), Strengbeton (1941) og Letbeton (1967). Alle publikationerne stilede mod at sikre den ensartede kvalitet af materialer og udførelse, som var nødvendig for at markedet kunne fungere.

Efter medlemskabet af EF (senere EU) i 1973 udkom adskillige revisioner og tillæg, der skulle tilpasses den danske standard til de europæiske normer.

	Historisk oversigt over de i Danmark vigtigste betonkonstruktionsnormer og basisbeskrivelser
1908	DIF nr. 7. Normer for Jærnbeton-konstruktioner (rev. i 1913, 1921, 1930)
1949	DIF/DS 411 Beton- og jernbetonkonstruktioner (Samler og afløser tidligere DIF-normer for betonkonstruktioner, vandbygning og skorstene)
1973	DIF nr. 116/DS 411 Norm for betonkonstruktioner 2. udg.
1979	Almindelige arbejdsbeskrivelse for broer, AAB Broer
1984	DIF nr. 169/DS 411 Norm for betonkonstruktioner 3. udg.
1986	Basisbetonbeskrivelsen (BBB) bliver standard for statsligt betonbyggeri

	Historisk oversigt over de i Danmark vigtigste betonkonstruktionsnormer og basisbeskrivelser
1987	Fælles arbejdsbeskrivelse (FAB) for Storebælt udgives af Storebælt forbindelsen før opstart af Storebæltsbroen i 1988
1997-98	DS 481 Betonmaterialer og DS 482 Udførelse af betonkonstruktioner afløser BBB
2004	DS/EN 206 (fremstilling af beton) og DS/EN 13670 (udførelse af beton) med danske tillæg erstatter DS 481 OG 482 (se også kap. 14)
2009	De europæiske Eurocodes 1- 9 med danske annekser erstatter bl.a. DS 411 Betonkonstruktion
2013	Den europæiske standard for betonreparationer EN 1504-serien bliver gældende i Danmark.

Tabel 1. Oversigt over normer. For en fuld oversigt over DIF'S normer fra 1902 til 1992 se Normstyrelsen "99 år var normen" samt Ervin Poulsen "Betonkrav- og praksis". Se også betonhåndbogens kapitel 14 om normer, standarder og CE-mærkning.

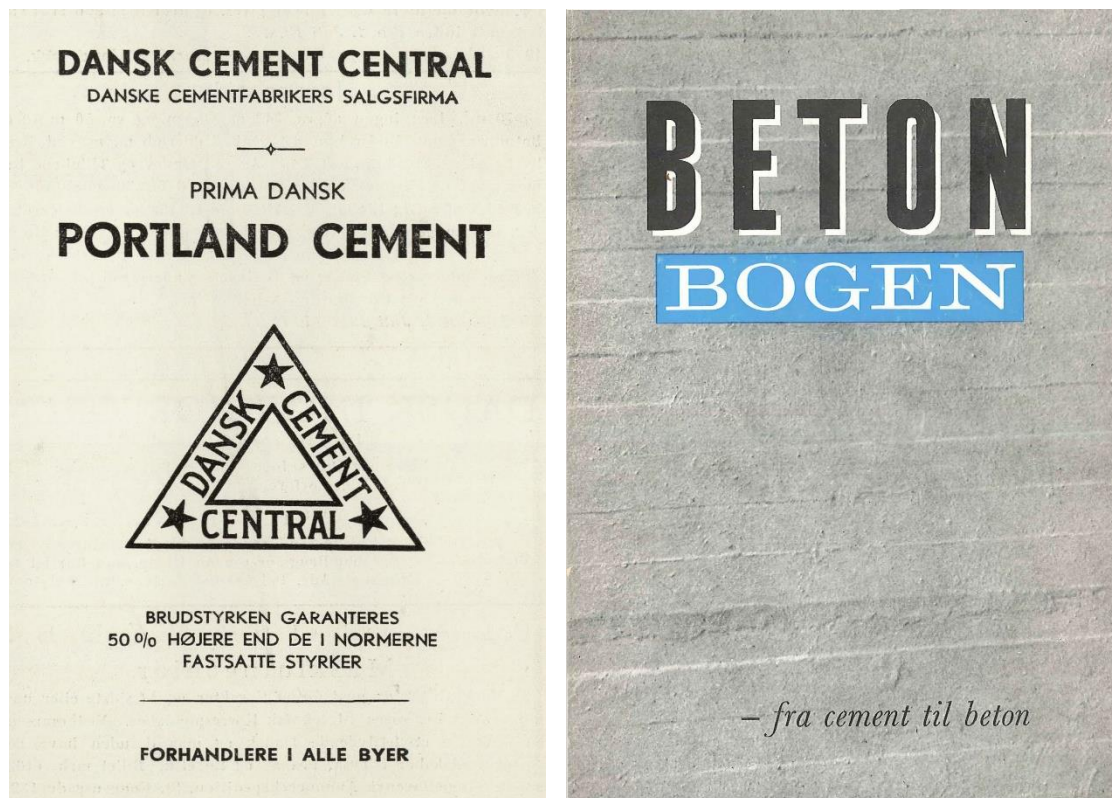
Der skete også en institutionalisering på andre områder, som oftest på initiativ af betonbranchen selv. Foreningen Dansk Cementvareindustri blev stiftet i 1917. Den oprettede en frivillig kontrolordning for betonvarer. Godkendte varer blev mærket med en trekant, og ordningen blev indarbejdet i DIF's betonnormer i 1939 og herefter i Dansk Standard i 1941. Aalborg Portland oprettede i 1934 Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor (CtO) og begyndte at udgive tidsskriftet Beton-Teknik året efter og i 1978 Beton-Bogen, der foreligger i en anden udgave fra 1985. Betonbranchen oprettede også i 1947 interesseorganisationer som Dansk Betonforening under Dansk Ingeniørforening – nu IDA. Dansk Betonforening udgiver www.betonhaandbogen.dk, som dette kapitel er en del af.

Normerne, kvalitetsmærkninger og fælles vejledninger afspejlede specifikt danske forhold og var afgørende for, at betonen fik indpas i dansk byggepraksis.

1.2.6.3 Stadig nye anvendelser

I de første årtier af det 20. århundrede var det ikke mindst betonens konstruktive muligheder og tekniske egenskaber, der blev udforsket og afprøvet med store spænd og udkragninger og organiske former, der udtrykte jernbetonkonstruktionens monolitiske karakter.

I Danmark brugte man i vid udstrækning jernbetonen til broer, havne, industri- og erhvervsbygninger, men i forhold til udlandet var man i Danmark langsom til at bruge jernbeton til husbyggeri. I 1916 udgav DIF dog husbygningsnormen, som henviste til 1908-normerne. Hermed var det tydeligt, at jernbeton også vandt indpas til husbyggeri og ikke kun blev brugt til infrastruktur og militæranlæg.



Figur 17. Det trekantede kvalitetsmærke og betonbogen er begge udtryk for, at arbejdet med beton efterhånden blev institutionaliseret.



Figur 18. Nogle af de tidligst kendte jernbetonbygninger i Danmark er Christiansborg Slot, der blev bygget fra 1902 -1928, det tidligere musikkonservatorium i København og Statens Museum for Kunst. På fotografiet ses Christiansborg under opførelse. Foto: Teknologihistorie DTU

Udvikling af jernbeton til boligbyggeri, særligt etagebyggeri, blev bl.a. begrænset af, at det først blev tilladt i Københavns kommune i 1939. Indtil da blev beton derfor i boligbyggeri mest brugt til støbte fundamenter (uden jern) og brandsikring af etagedæk. På initiativ af Dansk Cement Central blev der dog bygget prøvehuse, fx Brogården i Ålborg (1928) og arkitekten Fritz Schlegel's tre små forsøgshuse i Hellerup-Gentofte (1931-33).



Figur 19. Brogården i Ålborg, opført helt i jernbeton for betonfirmaet Danalith i 1934. Danalith stod også bag opførelsen af tre forsøgshuse i jernbeton i Gentofte, men det var små enfamiliehuse. Foto: Aalborg Stadsarkiv. Fotograf ukendt.

Under 2. verdenskrig lagde krigsindustrien beslag på råvarer og arbejdskraft, fx til byggeriet af tusindvis af bunkers langs den jyske vestkyst. Jern og cement, benzin til transport og arbejdskraft blev en mangelvare til civilt byggeri. I Danmark blev der indført rationeringer med vareforsyningsloven i 1939, og fra 1942 måtte portlandcement kun anvendes til særlige formål. Det lagde en dæmper på udviklingen og førte endog til lempelser af betonkvaliteten, fx blev kravet til v/c forholdet ophævet.

Rationeringen forsvandt gradvist efter krigen, og der kom også større bevægelighed. Markeder åbnede sig, og det blev nemmere at rejse. Marshall-hjælpen støttede både investeringer i nye produktionsapparater og studierejser til USA. I 1952 blev der fx udgivet en rejseberetning med en rapport over betontechnologiske studier i USA. Rejsens formål havde været at studere metoder til at gennemføre byggeri om vinteren trods mørke og kulde, bl.a. ved at tilføre kunstig varme, når beton blev udstøbt ved lave temperaturer. I betonhåndbogens kapitel 19.1.1.1. kan man læse mere om studieturen, som endte med at få stor betydning på et helt andet område.



Figur 20. I Polen opførtes i 1911-13 Centennial Hall med en kuppel båret af jernbetonbjælker af arkitekten Max Berg. Kuppen med den indre diameter på 65 m er 1½ gang større end Pantheons i Rom og var den største kuppel bygget i samtiden. Foto: Grethe Pontoppidan.



Figur 22. Også før studieturene i kølvandet på Marshall-hjælpen havde man i Danmark været interesseret i at studere brugen af beton i USA. I 1923 rejste Suenson til USA for at studere betonveje. Fotos: Teknologihistorie DTU.

1.2.7 Rationalisering, fabriksbeton og æstetik ca. 1950-1985

Generelt tog brugen af beton til i en sådan grad i årtierne efter krigen, at Aalborg Portland i 1977 i et lille skrift kaldet "Beton i den danske hverdag" kunne hævde, at beton var overalt omkring os, ofte valgt og anvendt som noget selvfølgeligt, der ikke blev bemærket til daglig. Beton var med cementfabrikkens egne ord en afgørende forudsætning for den begyndende masseproduktion og udviklingen af byerne med boliger, skoler, industrianlæg, kontorer, plejehjem, hospitaler, kloaksystemer, rensningsanlæg,

trafiksystemer osv. Hvor beton tidligere overvejende blev anvendt til produktionsbygninger, blev det nu et af svarene på boligmanglen.

1.2.7.1 Fabriksbeton

I årene efter den 2. verdenskrig flyttede produktionen af færdigstøbte betondele i højere grad ind på fabrikkerne. Fabriksproduceret beton som chokbeton, forspændt- eller strengbeton, let- eller gasbeton var nogle af de betontyper, som for alvor bed sig fast i markedet.



Figur 22. Den hollandske chokbeton, som Højgaard og Schultz fik licens på i 1951, var et fabriksprodukt med høj styrke og tæthed, som gjorde det muligt at minimere konstruktionsdimensionerne. Chokbeton bliver komprimeret ved at lade formen falde ca. 1 cm gentagne gange. Strengbeton, eller for- og efterspændt beton, som den franske ingeniør Eugene Freyssinet havde taget patent på i 1928 og 1939, øgede konstruktionernes spændvidder og mindskede materialeforsbruget. Det blev standard til bærende konstruktionselementer i meget byggeri, blandt andet svømmebassinerne i efterkrigstidens mange nye friluftsbade. Den lette gasbeton, der var nem at håndtere og forarbejde manuelt, blev tilpasset de nye standardmoduler for byggeri og blev ikke mindst populær til det store nye marked for enfamiliehuse. Nedsættelse af konstruktionernes egenvægt i forbindelse med monteringen på arbejdspladsen medvirkede endvidere til anvendelsen af præfabrikerede elementer. Foto til venstre: B.J. Rambøll. (1955). Rationelt byggeri. Foto til højre: COWI STORY.

En af de første betonfabrikker var K. K. Hindhedes fabrik, der siden 1926 havde leveret færdigblandet beton og opfundet roterbilen, der kunne levere flydende beton til byggepladserne. Nu blev fabrikken suppleret med de første større betonelementfabrikker. Entreprenørfirmaet Højgaard og Schultz etablerede en elementfabrik i Herlev i 1950, og året efter byggede entreprenøren Larsen og Nielsen en fabrik i Brøndby. Det skete med Marshall-hjælp og en stor ordre fra forsvaret i ryggen.

På fabrikkerne blev betonen fremstillet under mere kontrollerede vilkår end på en byggeplads. Den kontrollerede produktion betød, at mange nye metoder og principper blev taget i brug, såvel fremstillingsmetoder som betonsammensætninger.

Tidligere havde den eneste mulighed for at øge betonens bearbejdelighed været at tilsætte mere vand, hvormed man måtte gå på kompromis med betonens styrke og porøsitet (holdbarhed). I 1930'erne introduceredes en gruppe tilsætningsstoffer under den samlede betegnelse befugtningsmidler, senere kaldet plastificeringsmidler (se betonhåndbogens kapitel 3.4.5).

Med introduktionen af disse midler blev det muligt at få betonen gjort mere flydende uden at skulle tilsætte mere vand. Betonen blev nemmere at arbejde med og få til at flyde ud i formene uden at gå på kompromis med styrken.

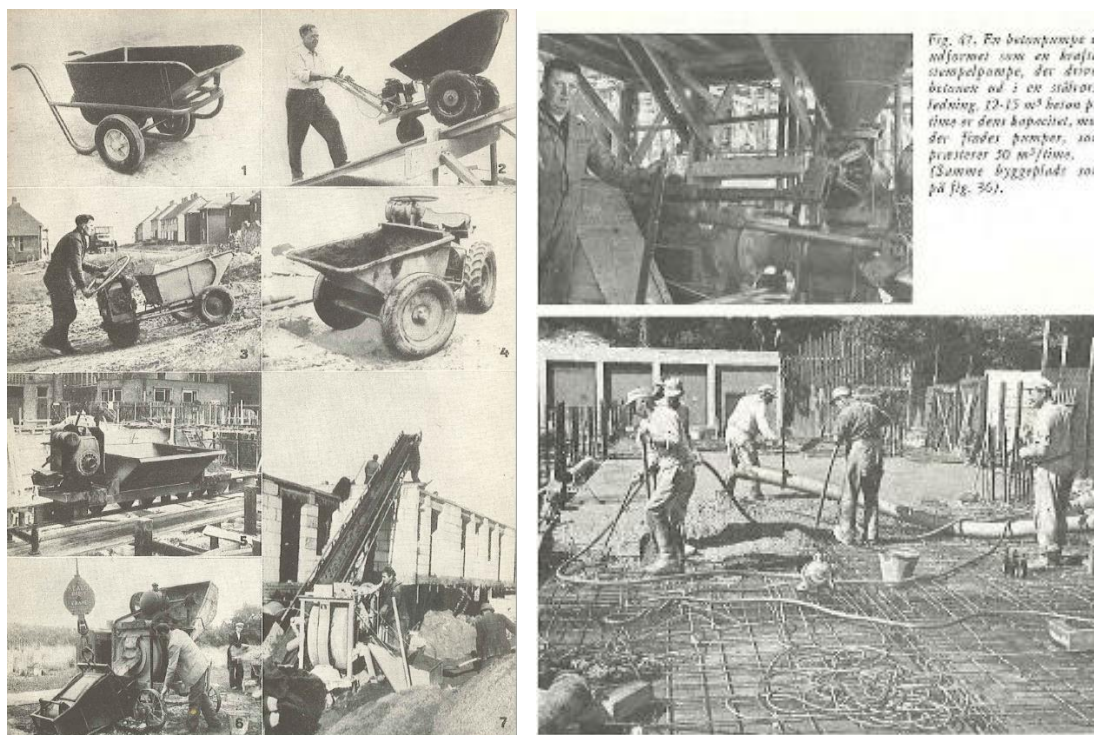
Luftindblanding blev udviklet i USA i 1940'erne og introduceret i den danske norm i 1954. Luftindblanding gjorde betonen mere frostsikker, men det blev først almindeligt brugt i Danmark fra slutningen af 1960'erne.

1.2.7.2 Rationalisering

I 1949 blev det såkaldte produktivitetsudvalg nedsat med repræsentanter for både arbejdere, arbejdsgivere og staten. Udvalget skulle behandle spørgsmålet om en effektivitetsforøgelse inden for dansk industri, og i deres arbejde så de bl.a. på byggeprisens bestanddele, herunder de praktiske muligheder for at bringe byggeprisen ned.

I efterkrigstiden var rationalisering og øget produktivitet generelt vigtige begreber, og i bogen "Rationelt byggeri" udgivet i 1955 af B. J. Rambøll blev begrebet rationalisering omtalt således: "Hvordan får man mest valuta for sine penge? Det er rationaliseringens virkelige mål. Penge som målestok for materialer og for besværet med at tildanne dem, valuta som målestok for opfyldelsesgraden af behovet.

Rationalisering har altså to sider: at komme så billigt som muligt til resultaterne og at nå de bedst mulige resultater. Det er teknikken, der har muliggjort den materielle udvikling Vor tids opdagelsesrejsende findes i laboratoriet og bag et skrivebord. Vore landvindinger må foregå gennem research og rationalisering".



Figur 23. Det var ikke kun på fabrikkerne, at industrialisering af byggeriet foregik. Også ude på byggepladsen blev forskellige maskiner og metoder, der skulle lette og optimere byggeprocessen, introduceret. Foto til venstre: Karnov, H.H. (1956). *Betonbøren*. København. Teknisk Forlag. Foto til højre: B.J. Rambøll. (1955). *Rationelt byggeri*.

En måde at rationalisere byggeriet på var ved at udvikle elementer og moduler, der kunne fremstilles på en fabrik.

Til etagebyggeri blev der derfor udviklet særlige byggesystemer med brug af jernbetonelementer, og især elementbyggeriet blev udviklet i disse år.

Det rationaliseringsfremmende formål med elementerne blev bl.a. beskrevet af civilingeniør Johs. Jørgensen i *Ingeniøren* i 1952: "Formålet med anvendelsen af de færdigstøbte elementer er gennem rationalisering at opnå prisbillighed, kvalitetsforbedring og forkortet byggetid; i anden række kan formålet være at lægge en større del af byggeprocessen over på ufaglært arbejdskraft, at begrænse træ-, cement- og jernforbruget, at opnå spinklere konstruktionsdele eller en særlig fin overfladekarakter". Man så altså mange fordele ved den nye byggemetode.

Udviklingen af fælles moduler (modulordningen) blev en forudsætning for den industrielle produktion af råhuskomponenter, og i forlængelse heraf var målet, at standardkomponenter og variationer skulle minimeres for at optimere byggeriet.



Fig. 17. Efter eneste søjle og bjælke, hvor eneste plade er støbt på stedet. Men pladsen er bejlet af store mobilkrane som kan række ind over øverste dæk i de 14 etagers høje. Den traditionelle opbyggede konstruktion er det på denne måde lykkedes at få i vejret på forsvarende kort tid. Hurtigere kunne det næppe gøres med selv det mest udpejlede elementbyggeri.



1. Planlægning og organisation

foretages af de projekterende teknikere og af entreprenører, der på den ene side er afhængig af bygherren, og på den anden side af bygningsarbejderne (faglærte og ufaglærte), som udfører den manuelle del af arbejdet.

34

ARBEJdstID

timer pr. lejlighed (73,6 m²)

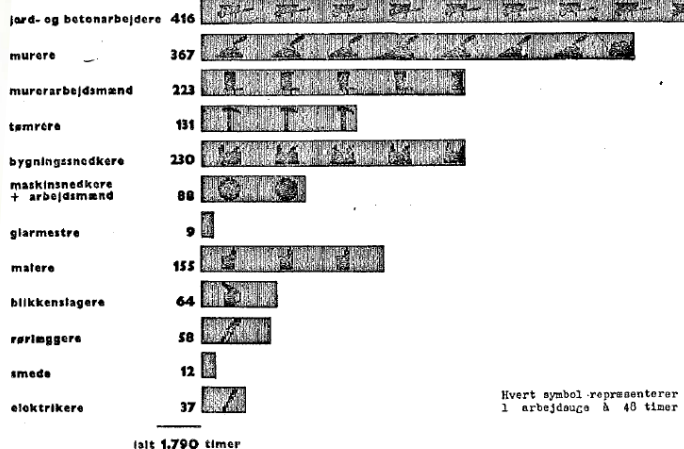


Fig. 10. Arbejdstidens fordeling på de enkelte fag ved et dansk 3-etagers boligbyggeri (lit.-benv. 5).

Figur 24. En konklusion på produktivitetsudvalgets arbejde blev, at det store behov efter byggeri kun kunne efterkommes ved "rationelt tilrettelagt byggeri med anvendelse af mindst mulig arbejdskraft". Foto til venstre: B.J. Rambøll. (1955). Rationelt byggeri. Foto til højre: Boligministeriets Produktivitetsfundsudvalg. (1954). Boligbyggeriets produktionstekniske problemer. København. Teknisk forlag.

I 1952 bevilgede boligministeriet midler til teknisk-videnskabelig forsknings- og forsøgsvirksomhed, og disse midler blev stillet til rådighed for DIF til brug for et udvalg vedrørende byggeriets rationalisering, især montagebyggeri. DIF valgte at nedsætte fire arbejdsudvalg samlet under den fælles betegnelse: Byggerationaliseringsudvalget. De fire udvalg arbejdede med henholdsvis en statusrapport over montagebyggeriet; facadeelementers rationelle opbygning og virkemåde; statiske problemer i montagebyggeri samt fuger, tolerancer og installationer.

1.2.7.3 Mønsterbyggerier og betonens holdbarhed

De mange udfordringer ved byggeriets industrialisering blev der arbejdet med i 1950'erne og herefter tog byggeriet fart. Ikke mindst efter vedtagelsen i 1960 af Montagecirkulæret, der favoriserede betonelementbyggeri frem for muret byggeri med faglærte håndværkere. I løbet af de næste årtier opførtes omfattende boligbebyggelser såsom Albertslund Syd og Brøndby Strand foruden industribygninger og offentlige institutioner som skoler.

Med de fabriksfremstillede elementer havde man tillid til, at man kunne styre betonens kvalitet. Man stolede på, at den kontrollerede beton havde bedre tæthed og var korrekt komprimeret og sparede på materialerne ved at lave mindre dæklag. Elementbyggeri var nemlig ikke omfattet af 1949-betonnormen (DS 411).

Generelt for perioden gjaldt det, at der var et ønske om, at normerne alene skulle indeholde de nødvendige krav og liden ellers sættes til de udførendes egen erfaring på baggrund af anvisninger. Et problematisk eksempel var anvendelsen af calciumchlorid som accelerator for hærdning. Metoden blev patenteret i England i 1885 og er formentlig anvendt i mindre grad i Danmark.

Hvorom alting er, beroede anvendelsen i Danmark de efterfølgende mange år alene på anvisninger, der frarådede anvendelsen i armeret beton, fordi calciumchlorid fik armeringen til at ruste. Faste regler for chloridindholdet i frisk beton indførtes i betonnormen fra 1973, men det var først med Basisbetonbeskrivelsen i 1986, at enhver tilsætning af calciumchlorid som accelerator blev forbudt, dvs. 100 år efter de første anvendelser. Historien om calciumchlorid er ikke et enkeltstående tilfælde, og der kan trækkes tråde til blandt andet alkalikiselreaktioner, der også blev diskuteret i disse år (se betonhåndbogens kapitel 19.1).

Det høje tempo og fokusering på optimering af arbejdsprocessen og pris i 1960'erne og 1970'ernes betonbyggeri gav problemer med kvaliteten. Holdbarheden af betonen stod i skyggen af rationalisering og produktivitet. Dette resulterede i, at boligområder der var tænkt som mønsterbyggerier, dels endte med store vedligeholdelsesudgifter, dels med at blive kaldt for betonslum.

Dermed kom betonen også til at symbolisere fremmedgørelse og sociale problemer. Som arkitekten Eske Kristensen udtalte i 1978: "Betonen ville ikke have fået det dårlige ry og modstand, som den fik, hvis man havde forstået at arbejde mere med mindre bygninger og mere varierende facader".

Med oliekriserne i 1970'erne blev byggeriet sat i bero, og økonomi, pris og holdbarhed blev i højere grad en afgørende faktor. Oliekrisen betød også, at mange af de daværende cementfabrikker bukkede under, og da krisen var overstået, var kun Aalborg Portland tilbage.

Efter oliekriserne øgedes produktionen af flyveaske, da brændsler på kraftvarmeværker blev ændret fra olie til kul. Flyveaske er et puzzolan, og der blev lavet forsøg med at erstatte en del af portlandcementen med flyveaske. I begyndelsen af 1980'erne introduceredes portlandflyveaskecement med 20-25 vægtprocent flyveaske. Omkring 2020 går udviklingen lidt den anden vej, da udfasning af kul på kraftværkerne reducerer mængden af flyveaske i Danmark.

1.2.7.4 *Betonen som æstetisk materiale*

Hvor der før krigen især var fokus på de nye konstruktive muligheder – og udfordringer – som betonen gav, så begyndte der i Europa i 1950'erne at vokse en større interesse for betonens æstetiske egenskaber frem. På engelsk opstod begrebet "architectural concrete", som betyder, at betonen både tjener konstruktive og æstetiske formål. I Danmark diskuterede man betonens "overflade" og "facadebeton", først som et spørgsmål om holdbarhed, siden også med interesse for variationsmulighederne i udtrykket.

Arkitekter verden over, der med funktionalismen var blevet opdraget til at undgå "fal-ske" dekorationer og i stedet arbejde "ærligt" med materialerne, lod sig inspirere af den schweiziske arkitekt Le Corbusiers ekspressive brug af beton, og de begyndte især at udforske udtryksmulighederne i den in situ-støbte beton (se mere om betonarkitektur i betonhåndbogens kapitel 1.3.1.3).

De forfinede støbeformene og vibrationsteknikken, eksperimenterede med farven i cementen, sandet og tilslaget. Det blev almindeligt at afvaske eller sandblæse cementhuden, så tilslaget blev synligt. Der blev arbejdet med formolier, som forhindrede lufthuller i rå beton og syrebehandling og "retardere", som gjorde det muligt at afvaske cement-sløret. Dermed fik man 'fritlagt beton', som mange kender som "søstensbeton", selv om der kan være brugt mange andre former for tilslag end søsten.

I Norge udviklede arkitekten Erling Viksjø "naturstensbeton" med et tilslag, der egnede sig særlig godt til sandblæsning og reliefkunst. Sandblæsningsmetoden bliver udstillet på en byggeudstilling i Oslo så tidligt som i 1958. Senere i 1970 bliver den brugt på den norske regeringsbyggnings facader, bl.a. til relieffer af Picasso.

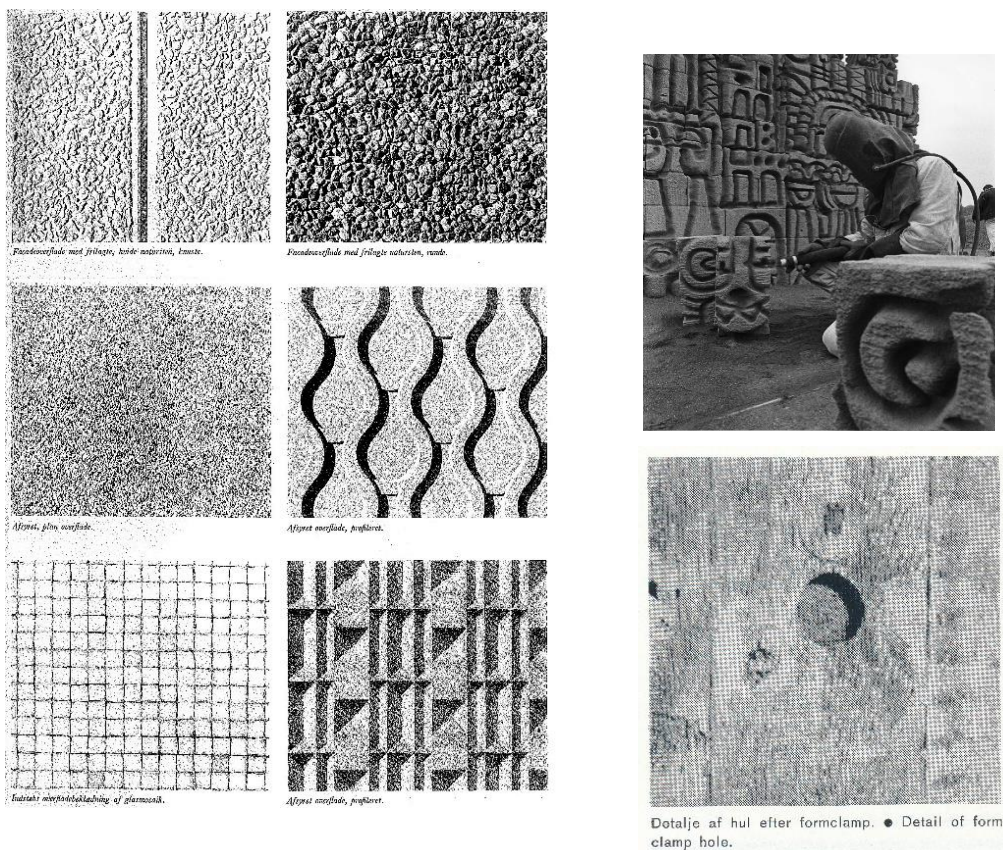
Naturstensbetonen kunne bearbejdes mekanisk, efter at den var støbt. Et engelsk byg-gefirma John Laing udviklede Faircrete, en fiberbeton, som man kunne presse op til ½ m dybe mønster i eller bearbejde skulpturelt, inden den størknede. Faircreten blev brugt til monumentalkunst som fx relieffer af Jesus i Clifton Cathedral i Bristol, UK.

Interessen for synlig beton voksede med tiden bredt i betonbranchen. I den rationelle og industrielle produktion var det en oplagt mulighed for at spare flest mulige produk-tionsled såsom efterpudsning og maling. Fabriksfremstillede elementer gjorde det mu-ligt at kontrollere fremstillingen og sikre et ensartet og tæt produkt, men betonbranchen var også opmærksom på at give betonen et bedre ry end "kedelig grå". Man udviklede overflader som bedre modstod vejrlig gennem profileringer og teksturer, og med ele-mentbyggeriet forfinede man også detaljerne til fuger, kanter, afdækninger, afstands-propper og løftehuller, som nu var fuldt synlige, men også nødvendige at have styr på, hvis betonen skulle kunne holde til at stå ude.

1.2.8 Kvalitetsarbejde og videre udvikling efter 1985

I 1983 havde mange fået nok af de mange problemer med beton. Betonbranchen etab-lerede derfor et initiativ under Akademiet for de Tekniske Videnskaber (ATV), der fik til opgave at gennemføre forskning, udvikling og undervisning, der skulle sikre betonbyg-værkers holdbarhed.

Resultaterne blev primært implementeret gennem en publikationsrække fra SBI, der omfattede bøger med titler som "Også beton skal vedligeholdes", "Simple betonrepara-tioner" og "Eftersyn af beton" samt ikke mindst Ervin Poulsens "13 betonsygdomme".



Figur 25. Til venstre: Illustration af forskellige overflader på betonelementer fra artikel af overingeniør i Højgaard & Schultz A/S, Lars Graversen, i tidsskriftet Arkitekten 1965. I artiklen argumenterer Graversen for et tættere samarbejde mellem betonelementindustrien og arkitekter. Til højre, øverst: Foto af sandblæsning. Fra Poul Marsh, *Concrete as a visual material*. Udgivet af den engelske Cement and Concrete Association i 1974. Til højre, nederst: Detalje fra betonmur på Holbæk Seminarium af arkitekt Gerdh Bornebusch. Fra artikel i *Beton-Teknik* 1964, hvor Bornebusch beskriver, hvordan brædeforskallingsmønsteret, bræddebredde og de synlige aftryk af formclamps'ne var nøje bestemt, ligesom sandet, der gav betonen dens varme grå tone.

Vigtigere blev det dog, at ATV udviklede Basisbetonbeskrivelsen, BBB. Heri blev der bl.a. stillet skrappe krav til v/c-forholdet og tilslaget for at undgå alkaliselreaktioner. BBB skulle i henhold til et cirkulære fra Byggestyrelsen i 1987 anvendes obligatorisk i statsligt og statsstøttet byggeri og blev altså de facto en dansk standard for husbygning. I den danske betonbranche anses BBB for at være afgørende for, at betonbranchen fik styr på betonens kvalitet – startende i det statslige og statsstøttede byggeri. BBB's krav blev senere generelt implementeret i både det danske normsystem og til anlægsarbejder som broer og tunneler.

1.2.8.1 Storebæltsforbindelsen og europæisk harmonisering

1987 var også året, hvor byggeriet af Storebæltsforbindelsen blev vedtaget i Folketinget efter mange års forberedelser og diskussion. Ligesom befæstningen af København i slutningen af 1800-tallet blev byggeriet afsættet for nye kravformuleringer til beton. Inden byggeriet gik i gang, udgav Storebæltskonsortiet en fælles arbejdsbeskrivelse (FAB) for betonen til både tunnel, højbro og lavbro. FAB satte høje kvalitetskrav til betonarbejdet mht. holdbarhed, styrke, homogenitet og kvalitetssikring. På Storebælt

(åbnet 1997 – jernbane – og 1998 – motorvej) blev der for første gang krævet en konkret levetid (100 år) af den anvendte beton mod byggebranchens ca. 50 år. Med Øresundsbroen (åbnet 2000) blev levetidskravet sat op til 120 år.



Figur 26. Etorstilet arbejde med udvikling af krav til en beton med lang levetid blev søsat i forbindelse med opførelsen af Storebæltsforbindelsen. Den primære opgave var at udvikle en beton, der var tæt over for indtrængende chlorid. Som beskrevet i betonhåndbogens kapitel 3.5.1 og 3.5.2 blev både flyveaske og mikrosilica krævet anvendt til betonen. Foto: Christian Munch-Petersen.

Udviklingsarbejdet i forbindelse med opførelsen af de store anlægningsarbejder gav sig således udslag i en stor opbygning af kompetence, og den danske betonbranche var langt fremme i forhold til udlandet. Viden om beton var en eksportvare, hvor danske virksomheder kunne fungere som rådgivere ved udenlandske anlægsarbejder i fx Mellemøsten og Asien.

I 1990'erne fortsatte den løbende tilpasning og overgang til de europæiske normer, der var begyndt med indtrædelsen i EF. I 2004 overgik Danmark til den europæiske betonstandard EN 206-1, dog med danske tillægskrav, se betonhåndbogens kapitel 2. Den europæiske tilpasning kulminerede med overtagelse af de fælles europæiske Eurocodes

i 2009 med forskellige nationale annekser og ekstra standarder for de ikke-harmoniserede arbejdsområder.

Der pågår fortsat udviklingsarbejde, og i nyere tid er der ikke mindst kommet øget fokus på grøn beton og beton som et bæredygtigt materiale, hvilket sætter nye krav til materialet. Betonen fortsætter med andre ord med at blive udfordret i relation til samfundets krav og behov.

1.2.9 Fremtidens beton

Betonens historie favner vidt. Det er en historie, som globalt peger på en råstofbaseret lokal – og for Danmark national – materialeudvikling og senere industrialisering.

Beton er et materiale, som har dybe rødder i Danmark, ikke kun i form af råstoffernes forekomst i vores undergrund, men også i vores bygningskultur – på godt og ondt. Beton er i praksis et aftryk af netop det samfund, de sammenhænge og den kultur, den er blevet produceret i.

Gennem det 20. århundrede har brugen af beton været motiveret af behov og ønsker om at skabe nye fysiske omgivelser: flere boliger, større konstruktioner og infrastruktur, som kunne binde verden sammen.

Fokusset har de seneste år dog peget mere i retning af bæredygtighed og ønsket om, at de eksisterende ressourcer udnyttes mere optimalt. Både materialet beton og vores opfattelse af det udvikler sig fortsat.

Udvikling af beton handler i dag ikke kun om at udvikle ny beton, men også om at optimere måden, vi reparerer og vedligeholder den historiske beton på. Det kan vi kun gøre, hvis vi forstår beton, ikke bare som et universelt, men **også** som et tids- og stedsafhængigt materiale.

Det er denne forståelse, vi har søgt at bidrage til i dette kapitel.

1.2.10 Litteratur

- [1] Dan, M.B., Prikryl, R., Török, A. (red.) (2010). *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Dorecht. Springer.
- [2] Graversen, L. (1965). *Betonelementindustrien – Ny teknik, nye muligheder*. København. Arkitekten.
- [3] Idorn, G.M. (1997). *Concrete progress*. London. Thoams Telford Publishing.
- [4] Johansson, S. (2006). *Hydraulisk kalkbruk*. Doktorafhandling ved Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg.
- [5] Lea, F.M., & Hewlett, P.C. (2004). *Lea's chemistry of cement and concrete*. New York: Elsevier Butterworth-Heinmann.
- [6] Pedersen, Morten (2019): *Cementen*. Aarhus. Aarhus Universitetsforlag.

- [7] Poulsen, Ervin (1989): *Betonkrav og -praksis: normer, forskrifter, dokumenter og faglitteratur 1888-1988 i uddrag til brug i skadesager vedr. betonkonstruktioner*. Hørsholm. Statens Byggeforskningsinstitut.
- [8] Rambøll, B.J. (1955). *Rationelt byggeri*. København. Teknisk Forlag.
- [9] Suenson, Edouard (1911): *Byggematerialer IV. Lervarer. Mørtler. Beton. Kunststen. Glas*. København. P.E. Bluhmes Boghandel.
- [10] Suenson, Edouard (1927): "Jernbetonens historie i Danmark" i Den Tekniske Forenings Tidsskrift s. 103-108. København. Den Tekniske Forening.

Mange kilder til dansk betonhistorie findes digitalt på Dansk Byggeskiks digitale bibliotek <https://danskbyggeskik.dk/> samt Ingeniørens Danmarkshistorie <https://ing.dk/danmarkshistorie>.