

NY BETONS FORM

For kæmpe
konstruktioner

Anja M. Bache



NY BETONS FORM

For kæmpe konstruktioner

Præsentation af en ny betontechnologi, Compact Reinforced Composite, CRC, og visioner for dens formverden for kæmpestore konstruktioner i byggeri.

Udviklingsprojekt finansieret af Knud Højgårds Fond, Fonden Realidania og Arkitektskolen i Aarhus. Realiseret ved Arkitektskolen i Aarhus 2002-2004

Anja Margrethe Bache
Rådvåd 14
2800 Kgs. Lyngby
86127414

Nogle af de modeller og skitser, der vises var udstillet på Charlottenborgs Forårsudstilling 2004 under titlen "BETONLAB"

Anja M. Bache



INDHOLDSFORTEGNELSE

DEN NY BETONS FORM FOR KÆMPEKONSTRUKTIONER

FORORD.....	3
MIN BAGGRUND.....	4
INDHOLD.....	5

DEN NY BETON.....6

Indledning.....	6
Forskningsrammer.....	6
Præsentation af Densit.....	8
Låsende overfladekræfter.....	9
Eliminering af låsende overfladekræfter.....	9
Partikler i Densit.....	9
Fiktivt v/c.....	10
Udstøbning af Densit.....	10
Densits styrker.....	10
Højstyrkebetoner.....	11
Problemer i træk.....	11
Løsning af problemer med træk.....	11
CRC et brudmekanisk design.....	12
Brudformer.....	12
Baches skørhedsmodul.....	12
Design af CRC ud fra skørhedsmodul.....	12
Brudform ikke en materialeegenskab.....	13
Design af CRC-materialer med stor brudenergi.....	13
Brudzoner.....	14
Design af CRC med stort elasticitetsmodul.....	15
Binderen i CRC.....	15
Den ny betons egenskaber.....	16
Præsentation af mekaniske egenskaber.....	16

CRC's deformationsopførsel.....	16
Udmattelse.....	16
Modstand imod stød, eksplosioner og stødhoveder.....	17
Fremstilling af konstruktioner i CRC.....	18
Den ny betons anvendelser.....	20
Anvendelser indtil videre.....	20
Husbygningsområdet.....	21
Byggesektoren.....	22
Anlægs- og maskinsektoren.....	23
Off-shore Industrien.....	24
Sikkerhedsindustri.....	24

DEN NY BETONS FORM.....25

Indledning.....	25
Designforum.....	25
Visioner for en ny betons formverden.....	27
Model 1.....	28
Model 2.....	34
Model 3.....	41
Model 4.....	49
Model 5.....	56
Model 6.....	62
Model 7.....	67
Model 8.....	75
Model 9.....	81
Afrunding.....	88

LITTERATURLISTE.....89

Litteraturliste.....	89
Billedhenvisning.....	89
Litteraturliste til Definition af beton, Appendiks 1.....	90
Litteraturliste til Den Konventionelle armerede betons historie, Appendiks 1.....	90

Billedhenvisning til Den konventionelle armerede betons historie, Appendiks 1.....	90
Anbefalet uddybende litteratur om den ny betonteologi.....	91

APPENDIKS 1.....93

KONVENTIONEL ARMERET BETON 93

Definition af konventionel armeret beton.....	93
---	----

KONVENTIONEL ARMERET

BETONS HISTORIE.....94

Indledning.....	94
Cements historie.....	94
Den armerede betons udvikling.....	96
Forspændt beton.....	99
Ferro Cement.....	100

FORORD

Der er udviklet en ny teknologi til design af meget stærke, relativt lette og ultraseje kompositmaterialer¹ ved Aalborg Portland A/S.

Teknologien er afprøvet indenfor keramer, metal- og plastikkompositter, men oftest med cement som bindemiddel, som en ny beton.

Den præsenteres som:

“Den ny betontechnologi”.

Den ny betontechnologi har store arkitektoniske potentialer både for de mindre byggerier/elementer, for eksempel slanke trapper og altaner, men også for de kæmpestore byggerier, som kæmpe slanke lufthavnskonstruktioner, haller til sportsanlæg, med videre, byggerier med spændvidder på 500-1000 meter. Med den ny betontechnologi er det muligt at realisere byggerier med det formsprog vi kender fra den konventionelle armerede beton, men også med et formsprog som har helt andre frihedsgrader og som kan realiseres op i en skala, der ikke er mulig med den konventionelle armerede beton.

Den ny betontechnologi åbner op for en helt ny formverden.

Men trods det at den igennem snart 20 år er brugt i mange sammenhænge² er den endnu kun i ringe grad inkluderet i arkitektonisk sammenhæng³.

I mit ph.d.-projekt,(2): “Compact Reinforced Composite, Under søgelse af en ny betontechnologis arkitektoniske potentialer vurderet ud fra holdbarhed, komfort og form” (Arkitektskolen i Aarhus 2002), blev jeg opmærksom på at det kan skyldes flere forhold. Det kan:

1. være fordi byggesektoren er traditionsbunden og fastlåst i regler
2. fordi der er kommunikationsbrister faggrupper imellem, men det kan også være
3. fordi den ny betontechnologis arkitektoniske potentialer og formverden endnu ikke er visuelt kendt.

På basis af specielt sidstnævnte grund formulerede jeg i 2002

udviklingsprojektet:

“En ny betontechnologis formverden for kæmpestore konstruktio-
ner”. Projektet indledtes i oktober 2002 og forløb indtil april 2004. Det består i en visuel undersøgelse og indkredsning af den ny betontechnologis formverden og er begrænset til kun at omfatte de kæmpestore konstruktioner.

Projektet er rettet imod byggeri. Det skal ses som et skridt i den ny betontechnologis udviklingsvej imod implementering i byggeriet.

Det er mit håb at jeg med dette projekt og formidling af projektets resultater i denne rapport kan være med til at gøre den ny betontechnologi og dens arkitektoniske potentialer synlige og forståelige for byggesektoren generelt og at det kan virke som inspiration for byggesektoren så denne i fremtiden anvender den i udfordrende, visionær arkitektur.

Knud Højgårds Fond, Fonden Realдания, samt Arkitektskolen i Aarhus har gjort det økonomisk og praktisk muligt at gennemføre dette projekt.

Til dem retter jeg en meget stor tak.

Note 1: Et kompositmateriale er ifølge Leslie Holliday, (1966) (9), et faststof, der er lavet ved fysisk at kombinere to eller flere eksisterende delmaterialer således at et multifase system opstår, hvor delmaterialemes forskellige fysiske egenskaber udnyttes.

Note 2: For eksempel som indløbsklove til cementmøller, som forstærkning af stålbuer, som dæksler i store bæltstummellen og indenfor off-shoreindustrien.

Note 3: Der er fremstillet meget slanke altaner, trapper i den ny beton.



MIN BAGGRUND

Jeg kender den ny betonteknologi fra uddannelser, projektarbejder, men også som følge af en familiemæssig relation til opfinderen.

Uddannelser

Jeg er uddannet:

1. Ph.d.kandidat fra Arkitektskolen i Aarhus (bestået 2002)
2. Skulptør fra Det Kongelige Danske Kunstakademi (bestået 1996)
3. Civilingeniør fra DTU (bestået 1994).

Projektarbejder relateret til den ny betonteknologi

Jeg har arbejdet med den ny betonteknologi ved en række forskellige projekter:

1. I 1986 lavede jeg patentTegningerne til den ny betonteknologi, ved en ansættelse i patentbureauet Plougmann og Vingtofte
2. I 1991 gennemførte jeg projektarbejde ved Aalborg Portland A/S med projektet: Dispergering og flydeopførsel af finpartikel-væskesystemer med høj volumen/partikelkoncentration. (3)
3. I 1992 gennemførte jeg et andet projektarbejde ved Aalborg Portland A/S med projektet "Undersøgelse af tilslag i frisk beton som funktion af bindemidlet, sammensætning og fremstillingsproces". (4)
4. I 1993 gennemførte jeg i samarbejde med Poul Henningsen et litteraturstudium i kompositmaterialer på DTU, herunder også den ny betonteknologi. (5)
5. I 1994 gennemførte jeg et afgangprojekt på DTU, hvor jeg afprøvede den ny teknologi indenfor metalområdet, "CRC-metal, et brudmekanisk kompositdesign". (6)
6. I 1998-2002 gennemførte jeg et ph.d.projekt på Arkitektskolen i Aarhus med titlen "Compact Reinforced Composite, undersøgelse af en ny betonteknologis arkitek-

toniske potentialer vurderet ud fra holdbarhed, komfort og form". (2)

7. Og endelig i dette projekt "En ny betonteknologis formverden for kæmpestore konstruktioner", fra 2002-2004, har jeg gennemført en visuel undersøgelse og indkredsning af den ny betonteknologis formverden for kæmpe konstruktioner.

Familiemæssige relation

Hvad angår den familiemæssige relation til opfinderen af den ny betonteknologi, Hans Henrik Bache, så er han min far. Han er og har altid været en meget stor inspirationskilde. Han er også årsagen til at jeg i første omgang blev opmærksom på den ny betonteknologi.



Figur 1: Hans Henrik Bache opfinder af den ny betonteknologi. Densit, (1978), (21) og Compact Reinforced Composite, (1986), (22). Hans Henrik Bache var ansat på Aalborg portland A/S som seniorforsker på daværende tidspunkt.

INDHOLD

Denne rapport er et resultat af udviklingsprojektet: "En ny betonteknologis formverden for kæmpestore konstruktioner".

Rapporten er opdelt i tre overordnede sektioner.

Den første sektion er med "indholdsfortegnelse", "Forord", "Min Baggrund" og "Indhold" en introduktion til projektet og rapporten, samt til min baggrund for at gennemføre det.

Den anden sektion, "Den Ny Beton", er en præsentation af den ny betonteknologi. Her indkredses dens teori, opbygning og nuværende anvendelser, herunder de firmaer som i dag beskæftiger sig med teknologien.

Gennemgangen af den ny betonteknologi er relativt overordnet. Ønskes en mere dybdegående gennemgang henvises til litteraturlisten, "Anbefalet uddybende litteratur om den ny betonteknologi", bag i rapporten, hvor specifikt litteratur om den ny beton er nævnt. For de læsere som ikke kender den konventionelle armerede beton og dens historie og som har en interesse herfor, henvises til appendiks 1, hvor det er beskrevet.

Den tredje sektion, "Den ny betons form for kæmpekonstruktioner", indeholder en præsentation af det designforum ud fra hvilket visioner for den ny betons formverden tager afsæt, samt en visuel præsentation af fysiske modeller og dertil hørende skitser. Som indledning til hver model gives en kort skriftlig introduktion til hvilke designprincipper, der er anvendt. Ellers får skitserne og modellerne lov til at fremstå stumt uden følgeskab af ord, så de kan opleves som synsbilleder for ideer, der ses før de forstås i deres hele.



DEN NY BETON

Materials science, the study of materials as a whole rather than in their special chemical, physical and engineering aspects is a fairly recent development. Indeed it has only lately become respectable....

Naturally the first task was one of understanding the observed phenomena, why solids in general, and especially the familiar materials, behave in the way they do though there are still a good many loose ends, this stage can broadly be said to be accomplished.

The problem now facing materials scientist is what to make use of their knowledge. The ambitious will want to apply materials science in radical ways, either by making substantial changes in the older materials, or else by inventing new and perhaps better ones. J.E. Gordon. 1984. (7)

Indledning

Den ny betonteknologi præsenteres.

Den indplaceres i forskningsrammer.

Teorien bag den forklares overordnet og dens materials opbygning gives. Så omtales nogle af de områder, hvor den ny betonteknologi anvendes i dag, herunder gives

adresser på de vigtigste af de firmaer som idag beskæftiger sig med den ny betonteknologi.

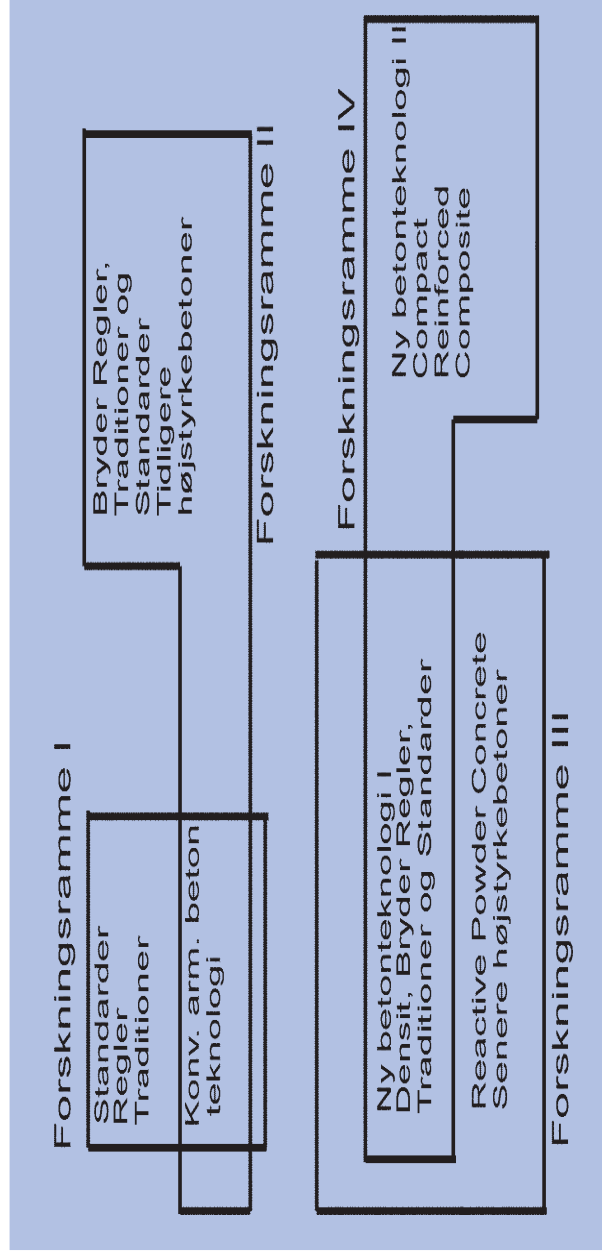
Præsentationen af den ny betonteknologi er søgt bibeholdt på et relativt overordnet og forhåbentligt let tilgængeligt plan.

Er der læsere som vil vide mere om teknologien er der i litteraturlisten nævnt litteratur, som er mere uddybende.

For de læsere, der ikke ved ret meget om konventionel armeret beton kan det anbefales først at læse om den konventionelle armerede betons historie i appendiks 1 i denne rapport.

Forskningsrammer

Hans Henrik Bache opfandt i 1978 Densit og i 1986 Compact



Reinforced Composite, (forkortet til CRC), som idag begge hører under betegnelsen "Den ny betonteknologi".

Den ny betonteknologi er ny i forhold til den teknologi, der er for den konventionelle armerede beton. (8). Betragtes de målsætninger, der er indenfor konventionel betonforskning, ser det ud til at disse på nogle områder er sammenfaldende med dem, der haves for den ny betonteknologi. Men den teknologi, de teorier og de rammer, hvorunder de udføres er forskellige.

Forskningsramme I

Den generelle betonforskning er opdelt, der er en del som bevæger sig indenfor den konventionelle armerede betons områder med accept af den teknologi som den konventionelle armerede beton er funderet i og accept af de rammer, i form af

for eksempel standarder, der er for den konventionelle armerede beton, figur 1 forskningsramme I. Forskningen er da primært rettet imod kvalitetsforbedring, for eksempel i forhold til miljø og brand, og i forhold til at opnå en bedre forståelse og beskrivelse af betonen.

Forskningsramme II

Der er en anden forskning, der bevæger sig indenfor den konventionelle armerede betons teknologi, men som ikke accepterer de grænser, der er for den, forskningsområde II.

Figur 1. Oversigt over forskningsrammer for betonforskning idag

Note 1: Hans Henrik Bache var dengang ansat som seniorforsker hos Aalborg Portland A/S i deres Betonforskningslaboratorium BFL, det senere CBL -Cement og Betonlaboratorium.

I denne forskning er målsætningen at forbedre den konventionelle armerede beton uden hensynstagen til de grænser, der er sat ved for eksempel standarder. Et eksempel er de tidlige højstyrkebetoner, der var baseret på den konventionelle betons teknologi, men som dengang havde højere styrker end de styrker, der blev angivet ved standarder.

Forskningsramme III og IV

Så er der en del af betonforskningen, der bevæger sig udenfor den konventionelle armerede betons teknologi, ved at anvende andre teknologier og som ikke accepterer de standarder, der er for den konventionelle armerede beton, forskningsområde III og IV. Den nye betontechnologis forskningsområde, den metode og de teorier, der anvendes er svarende til den sidstnævnte type forskning. Den nye betontechnologis materialer bryder den konventionelle armerede betons regler og der er anvendt andre teorier til opbygning af teknologien.

Målsætningen for udviklingen af Densit - "Densified - cement/ Ultra fine particle based materials", (21)- var primært at udvikle bindere med meget høje trykstyrker. Densit fører til betoner med markant højere trykstyrker end den konventionelle betons trykstyrker. (8). Det gør andre betoner som de senere højstyrkebetoner, H.S.B¹, og Reactive Powder Concrete, RPC², også. Disse betoner er baseret på teknologier som Densits.

Densitteknologien og dermed teknologien for højstyrkebetoner og Reactive Powder Concrete er en teknologi til design af bindere med meget store trykstyrker. Men de har forholdsvis lave trækstyrker og for relativt lave trækpåvirkninger, tendens til skør³ brudform i træk⁴. Disse materialer er derfor ikke anvendelige i bærende konstruktioner, der udsættes for både tryk og træk eller kun træk. Densitbinderen har så lille en trækstyrke at den bare ved udtørring bryder skørt. Se figur 1. I forskningen omkring højstyrkebetoner var dette problem i



Figur 1: Densit er meget stærk, men ekstremt skør. Hvis Densitbinderen optræder alene i form af store emner, revner disse ved udtørring. Det er vist på billedet, hvor Densitbinderen er udstøbt i større klumper. (2)

Note 1: "Senere højstyrkebetoner" er Højstyrkebetoner, der anvender Densitteknologi, fremfor den konventionelle armerede betons teknologi.

Note 2 patenteret i 1994 af Bouygues. (10).

Note 3: En skør brudform betyder at konstruktionen bryder ved imperfektioner i konstruktionen uden forvarsel, da der ingen plastisk deformation er.

Note 4: Materialerne har også en skør brudform i tryk. Trykbrud består iøvrigt ofte af trækbrud og flækning. Men trykbrud sker ved langt højere belastninger, end det er tilfældet for trækbrud for disse materialer, hvor trækstyrken er så relativt meget mindre end trykstyrken. Så i de konstruktioner, hvor der er både træk- og trykbelastning er det primært træksiden der er problematisk fordi det er her brudet sker først på grund af den lave trækstyrke

Note 5: En konstruktions brudform afhænger af konstruktionens størrelse og materialernes styrker, jo stærkere materialerne er og jo større konstruktionerne er, jo større chance er der for at konstruktionen bryder skørt.

1994 tilsyneladende stadig ikke løst. Der etableredes store forskningsprogrammer for undersøgelse af hvordan højstyrkebetoners store trykstyrker kunne anvendes effektivt i bærende konstruktioner, der udsættes for både tryk og trækbelastninger. (11). I Reactive Powder Concrete forspændes hovedarmeringen i betonerne så der ikke opstår træk-påvirkninger af betonen.

Hans Henrik Bache vælger en anden strategi. Han opfinder i 1986 en ny betontechnologi "Compact Reinforced Composite", CRC, der patenteres i 1986. Det er en teknologi, hvor materialer designes ud fra konstruktioners størrelse således at de selv for ekstraordinært store størrelser og relativt store trykstyrker, er seje og ikke revner hverken i tryk- eller træksiden⁵.

I mit ph.d.-projekt, (2), gennemførte jeg et litteraturstudium for at finde ud af om der var andre teknologier som den nye betontechnologi. Der er fundet teknologier, som er baseret på eller som har meget store ligheder med Densit. Det er højstyrkebetoner og Reactive Powder Concrete. Der er derimod ikke fundet teknologier, som minder om CRC-teknologien eller betoner med egenskaber som dem CRC-materialer opnår. Den nye betontechnologi, CRC, er derfor placeret i forskningsramme IV, figur 1 forrige side.

Præsentation af Densit

Densit anvendes idag oftest som binder i Compact Reinforced Composite. Derfor præsenteres Densit her. **Densit er en meget stærk binder, hvori der med fordel kan inkoopores og effektivt udnyttes meget stærkt tilslag.** Konventionel beton består af et hærdende bindemiddel¹, en væske², og fyldematerialer³. (8). Det hærdende bindemiddel og vandet tilsammen kaldes for betonens binder og fyldematerialet kaldes for tilslag.

Densit er en binder. Dens opbygning og mekaniske opførelse differentierer markant fra den konventionelle betons binder. Det er i forhold til:

1. hvordan partiklerne pakkes
2. hvilke partikler, der anvendes
3. hvor mange forskellige størrelser og geometrier af partikler, der anvendes
4. hvor meget vand, der bruges i forhold til cementindholdet i binderen, vand/cementforhold, v/c
5. hvorledes binderen flyder under udstøbning og ved
6. valg af tilslag til betonen.

Når binderen i den konventionelle beton pakkes tørt vil hulrummene imellem partiklerne -typisk cementkorn- være fyldt med luft. Ved iblanding af vand vil hulrummene blive fyldt med vand, der ved betonens hærdning i nogen grad erstattes af luft igen. Den konventionelle betonbinders styrke afhænger af partikelkoncentrationen. Den er givet ved pakningstætheden af vand-cementblandingen før dannelsen af den kemiske struktur. (13).


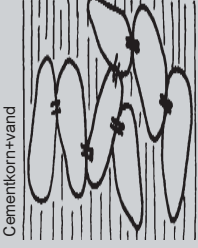

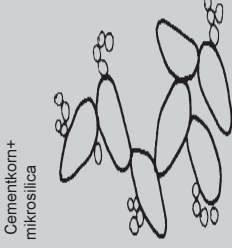
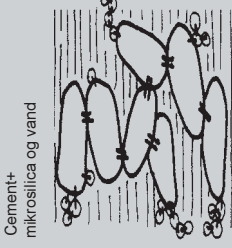
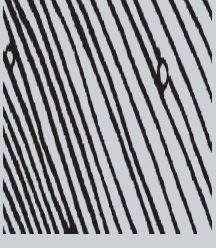
Figur 1 Model af bindere for konventionel beton og for densit.

Note 1: For eksempel cement, puzzolaner, flyveaske med videre

Note 2: For eksempel vand

Note 3: Tilslag og eller sten

MODEL AF KONVENTIONEL- OG DENSITS BINDER

Tør blanding	Våd blanding	Hærdet cementbinder
<p>Model af konventionel cementbinder</p>  <p>Cementkorn</p>	<p>Cementkorn+vand</p>  <p>v/c = 0.30-0.60</p>	 <p>Cementkorn+ vand</p> <p>Pakningstæthed 0,30-0,50</p>
<p>Model af Densits binder</p>  <p>Cementkorn+ mikrosilica</p>	<p>Cement+ mikrosilica og vand</p>  <p>v/c = 0.30-0.60</p>	 <p>Cement mikrosilica disperseringsmiddel og vand</p> <p>Pakningstæthed 0,60-0,80</p>

Med øget pakningstæthed opnås øget styrke. Den konventionelle beton er relativt åben og porøs med en pakningstæthed på 0,30-0,50.

Låsende overfladekræfter

Partiklerne i den konventionelle betons binder er fastlåst i en åben struktur af låsende overfladekræfter. Udfra en ren geometrisk betragtning er det muligt at øge pakningstætheden i bindere ved at inkoopere partikler, hvis diameter er mindre end binderens eksisterende partiklers diameter. De mindre partikler kan da udfylde de mellemrum, der er imellem binderens eksisterende partikler, og så fremdeles for endnu mindre partikler, for derved at øge pakningstætheden.

Men i den konventionelle betons binder er det ikke muligt, fordi der eksisterer låsende overfladekræfter, der bliver mere udtalte jo mindre partiklerne er. Det bevirker at de mindre partikler enten forringer eller også giver den samme pakningstæthed som for den konventionelle betons binder. Der anbefales derfor i konventionel betons bindere kun at inkoopere en meget lille mængde af mindre partikler¹.

Den konventionelle betons binder er så svag at der ikke er nogen ide i at inkoopere stærkere tilslag i betonerne fordi brudet alligevel hovedsageligt sker i binderen udenom tilslagene. (13).

Eliminering af låsende kræfter

I Densit er overfladekræfterne imellem partiklerne overvejende elimineret. Det bevirker at partiklerne stort set kan pakkes efter geometri og at styrken af binderen bliver en funktion af delmaterialernes styrker.

I slutningen af 1970'erne var der to hændelser, der førte til udviklingen af Baches Densified – cement/Ultra fine particle based materials, Densit. Det var opfindelsen af super-

dispersionsmidler² i slutningen af 1970'erne og det var professor ved Lunds universitet, Aud Tættebergs elektronfotos af mikrosilicacastøv³, der blev præsenteret ved et seminar i Stockholm også i slutningen af 1970'erne. (14)

De nye superdispersionsmidler, der er organiske produkter eller kombinationer af organiske og ikke organiske blandinger, (15), kunne i langt højere grad eliminere de overfladekræfter, der var imellem cementpartiklerne, således at partiklerne overvejende kunne pakkes efter geometri og så styrken af binderen var en funktion af delmaterialernes styrker.

Superdispersionsmidlerne virker ved at være overfladeaktive stoffer. De lægger sig på overfladen af partiklerne og virker som en slags sæbe imellem disse.

Mikrosilica-partiklerne var kugleformede og af middelstørrelse 0,1 mm, svarende til 1/50- 1/100 del af cements middelstørrelse.

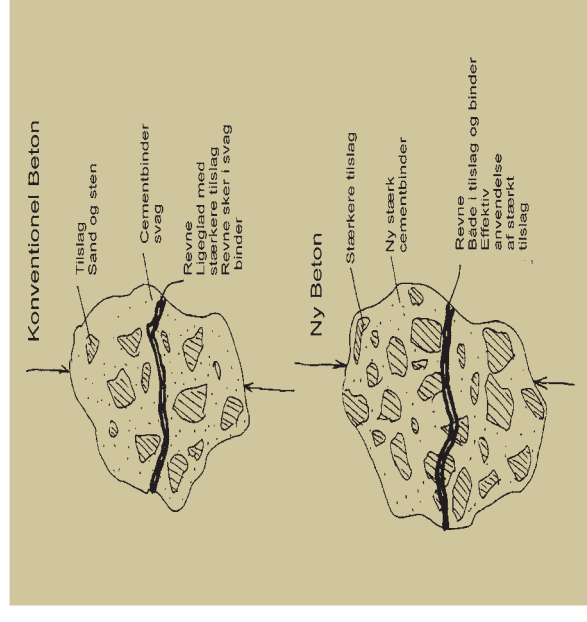
Mikrosilicaen og superdispersionsmidlerne var de "redskaber" Bache havde ventet på for at realisere de fysiske modeller han havde opstillet allerede i 1973. (16), (17)
Det førte til opfindelse og patentering af Densit i 1978.

Partikler i Densit

I Densit er de låsende overfladekræfter, der virker imellem partikler tildels elimineret med superdispersionsmidler, hvorfor der kan pakkes efter geometri og ved kornkurvergradering af de indgående partikler.

Densitbinderens partikler er valgt således at de varierer i størrelse og geometri, så de kan bidrage til en god udfyldning af hulrummene imellem større partikler.

Det bevirker at porøsiteten af Densitbinderen minimeres meget i forhold til porøsiteten i konventionel betons binder. Med Densitbinderen opnås pakningstætheder, som er betydeligt større end for den konventionelle betons binder. Densits



Figur 1: I konventionel beton kan det ikke betale sig at inkoopere tilslag fordi brudet alligevel sker i den svagere betonbinder.

I Densit, hvor binderen er 3-10 gange stærkere end den konventionelle betons binder, kan der effektivt inkoopere stærkere tilslag. Brudet sker da i både binder og tilslag.

Note 1: For eksempel 1: 5-10% mikrosilica (12)

Note 2: Dispersionsmidler på partikler frastøder i nogen grad dispergeringsmidlet på andre partikler, i stil med det, der kan observeres når to magnets nordpoler mødes.

Note 3: Mikrosilica er et affaldsstof fra fremstilling af silicium og ferrosiliciumproduktion.

pakningstæthed være en øget kontakflade imellem partiklerne. Det bevirker normalt en øget friktionsmodstand ved en kraftpåvirkning, der som regel resulterer i ringere flydeegenskaber og dermed ringere udstøbningsmuligheder.

I Densit er der en øget kontakflade imellem partiklerne. Men fordi partiklerne er så små bevirker disse at den vandmængde, der er i Densitbinderen forbliver imellem partiklerne som et smøremiddel i længere tid, end det er tilfældet for vandet i den konventionelle betons binder.

Fiktivt v/c

Vand / cementforholdet, v/c, er en angivelse af den vægt af vand, der er i binderen i forhold til vægten af cementen.

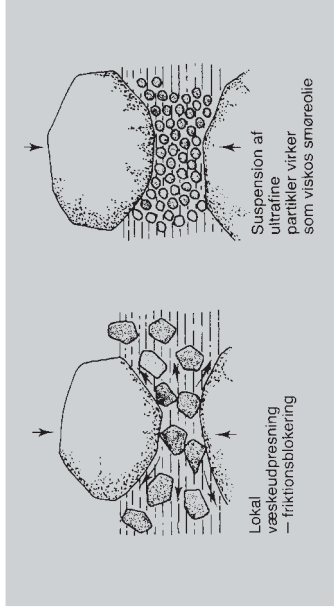
I Densitbinderen er vandindholdet betydeligt mindre end i konventionel betons. I konventionel betons binder er vand/cementforholdet imellem 0,30-0,60.

I Densit er det ikke muligt at bruge samme type måling for hvor meget vand, der er i binderen, fordi der i Densit er valgt at erstatte en meget stor del af cementen med andre partikler. Bache vælger derfor at angive:

1. "vægten af vandindholdet" i Densit som vægten af væske = vægten af vand og superdispersionsmidler.
2. "vægten af cement" angives som vægten af de faststofpartikler, der indgår i Densitbinderen = vægten af cement, finere partikler og ultrafine partikler.

Derved fremkommer det Bache kalder det fiktive vand/cementforhold. Densits fiktive vand/cementforhold er imellem 0,10 og 0,15.

De konventionelle betoners styrker afhænger primært af hydratiseringsprocessen i cementen og i mindre grad af cementkornenes styrker. I konventionel beton er vand/cementforholdet derfor en måling for styrken. Vand/cement-



Figur 1: Bindemidlet virker som smøremiddel. Under lokalt tryk kan væsken presses ud mellem de fine partikler og derved forårsage friktionsblokering. Med for eksempel 100 gange finere partikler øges modstanden imod friktionsblokering betydeligt idet udpresningstiden for suspensioner med geometrisk ligedannede partikelsystemer med 100 gange finere partikler øges med en faktor 10.000. (8)

forholdet er omvendt proportionalt med betonernes trykstyrker. (13).

I Densit er det styrken af de partikler, som indgår i binderen, der er afgørende for binderens styrke. Måling af styrken ud fra vand/cementforholdet er derfor ikke muligt med Densitbinderen. Densitbinderens styrker afhænger i høj grad af delmaterialernes styrker og delmaterialerne i Densitbinderen er ikke kun cement som i konventionel betons binder, men også mikrosilicapartikler, flyveaskepartikler eller helt andre partikler, der passer ind i Densits designstrategi.

Udstøbning af Densit

Når der er en større pakningstæthed i Densits bindere kunne det godt frygtes at den så ikke er til at udstøbe. Der vil nemlig som følge af den større

pakningstæthed være en øget kontakflade imellem partiklerne. Det bevirker normalt en øget friktionsmodstand ved en kraftpåvirkning, der som regel resulterer i ringere flydeegenskaber og dermed ringere udstøbningsmuligheder.

I Densit er der en øget kontakflade imellem partiklerne. Men fordi partiklerne er så små bevirker disse at den vandmængde, der er i Densitbinderen forbliver imellem partiklerne som et smøremiddel i længere tid, end det er tilfældet for vandet i den konventionelle betons binder.

Med mikrosilica i Densit, der er 100 gange mindre end cementkornene i den konventionelle betons binder, vil væsken imellem partiklerne i densitbinderen udpresses efter 10.000 gange længere tid¹, end væsken i den konventionelle betons binder. (8). Partiklerne i Densit vil således med en kraftpåvirkning, tryk og forskydning, som der haves ved udstøbning, forblive adskilt af den bibeholdt væske og dispergeringsmidlerne. Det bevirker at kontakfladerne imellem partiklerne minimeres.

Densits flydeegenskaber er derfor ekstremt gode, svarende til gode støbeegenskaber. (8).

Densits styrker

Densits bindere er 3-10 gange stærkere end binderne i den konventionelle beton. (8). I Densit kan der derfor med fordel iblandes stærkere tilslag. I den konventionelle betons binder er det ikke muligt at inkoopere stærkere tilslag, fordi brudet sker i den svage binder. I Densit med de stærkere tilslag sker brudet derimod både i binderen og i tilslaget. I Densit er det derfor muligt at erstatte for eksempel kvartssand og granit, som der anvendes i konventionel beton med stærkere tilslag som bauxite. Herved opnås en styrkeforøgelse i Densit fra 150 MPa til 250MPa. (12). Der er fremslået Densit med meget stærk

Note 1: for geometrisk ligedannede systemer.

fiberarmering i form af 6-12 volumenprocent fibre, der har trykstyrker op til 400MPa og der er ved særlig hærdning af Densit opnået styrker over 500MPa. (8).

Højstyrkebetoner

I betontforskningen opstod der omkring 1950 érne en ny betongren, højstyrkebetoner. Definitionen af højstyrkebetoner er givet ved de trykstyrker betonerne har. De første højstyrkebetoner var primært baseret på den konventionelle betons teknologi. Der anvendtes de samme partikler og den samme pakningsteori. Men der var opnået en tættere pakning af partiklerne¹.

Højstyrkebetonerne var fra 1950 til starten af 1970 érne ifølge Odd. E. Gjrv, (1994), (15), defineret som følger:

The definition of high-strength concrete has also been changing. Thus in the 1950's concrete with a compressive strength of 35 MPa, was considered high strength. In the 1960's concrete with 40-50MPa compressive strength was being produced and in the early 1970's 60 MPa concrete was produced. (15).

De højstyrkebetoner, der haves i dag er opbygget med samme teknologi som Densits og kan opnå styrker, der er som Densits styrker². Definitionen af højstyrkebetoner afhænger i dag af hvilket land definitionen gives i. Claus Vestergaard Nielsen, (1995), (18), skriver herom:

Højstyrkebeton, HSC, er i Danmark defineret som betoner med styrker over 50 MPa, der er styrke grænsen for konventionel armeret beton³. I Norge er det tilladt at have styrker på 105 MPa., hvilket er exceptionelt højt sammenlignet med den resterende verdens maxstyrker. (18).

I 1991-1992 havde firmaet Densit og det franske firma Bouygues et samarbejde omkring Densit i firmaet Densits regi. I 1994 patenterede Bouygues Reactive Powder Concrete, RPC.

Teknologien i Reactive Powder Concrete er som Densits, men i RPC er der fundet en partikel, der er mindre end de mindste partikler i Densit, hvorved styrken i Reactive Powder Concrete kan forøges i forhold til den, der haves i Densit. Der er med Reactive Powder Concrete lavet betoner med trykstyrker op til 800 MPa. (10).

Densit, højstyrkebetoner og RPC er bindere som har meget høje trykstyrker.

Problemer i træk

For at kunne anvende disse meget stærke materialer til konstruktioner, hvor der også er træk, inkooporeres ofte fibre og armering.

I højstyrkebetoner og RPC anvendes op til 2 volumenprocent fibre og omkring 4 volumenprocent hovedarmeringer. (15), (10). Men jo stærkere materialerne er og jo større konstruktionerne er, jo mere fare er der for at konstruktionerne bryder ved en ikke acceptabel brudform, det skøre brud⁴. I Konstruktioner, der kun påvirkes i tryk som for eksempel nogle søjler⁵gør, modvirkes det skøre brud ved inkooporering af trykarmering.

Men for konstruktioner, hvor der både er tryk og træk, som for eksempel den bøjningspåvirkede bjælke, er problemet langt mere udtalt for konstruktionernes trækside. Densit, Reactive Powder Concrete og højstyrkebetoner er materialer, der er designet til store trykstyrker, men som ingen eller som har relativt lave trækstyrker. Bøjningspåvirkede bjælkekonstruktioner af Densit, Reactive Powder Concrete og højstyrkebetoner vil derfor bryde skørt i træksideen langt før de bryder i tryksideen af konstruktionen.

I Reactive Powder Concrete omgås dette problem ved for det første at forspænde armeringene således at der ikke opstår træk i konstruktionerne og for det næste ikke at udnytte de stærkeste af Reactive Powder Concrete-materialerne.

I Højstyrkebetoner lader det til stadig at være et uløst problem. I 1994 beskrev Graham Ridout i en artikel, (11), et stort anlagt Brite Euram projekt, hvori der var så kendte parter som Taywood Engineering Laboratories, TEL i UK, Ove Arup og Pioneer beton. De fik 3 millioner pund til i løbet af 3 år at udvikle højstyrkebetoner med trykstyrker op til 110MPa, der også kunne anvendes til bærende konstruktioner.(11)

Løsning af problemer med træk

Bache vælger en tredje vej. Han opfinder i 1986 teknologien Compact Reinforced Composite, CRC. CRC er en teknologi for design af både binder, beton, den fiberarmerede beton og den hovedarmerede beton.

Design af CRC sker i forhold til konstruktionens størrelse. Målsætningen med CRC-teknologien er ud fra et helhedsorienteret brudmekanisk design at opnå materialer, der er meget stærke, som kan anvendes til ekstraordinært store konstruktioner, hvor der både er træk og tryk og som er

Note 1: Den tættere pakning af partiklerne blev opnået ved enten at påføre binderen en krattpåvirkning, hvorved partiklerne blev presset tættere sammen eller også ved at anvende deltidens relativt ringe dispergeringsmidler. Med dem var de løsende overfladedekkræfter imellem partiklerne formindsket, men slet ikke i den grad at de kunne betragtes som elimineret

Note 2: Der er lavet højstyrkebetoner, hvori der er inkooporeret keramer som tilslag, hvorved der er opnået styrker så højt som 500MPa

Note 3: Grænsen er i dag 60 MPa, (19)..

Note 4: Skørt brud sker uden et forvarsel.

Note 5: Ostenfeldtsøjler

ekstremt seje¹.

CRC et brudmekanisk design

CRC- teknologien er baseret på materialefysik, kapillarteori, colloidteori, kemi, samt flere andre teorier, men vigtigst er dog anvendelsen af brudmekanik, læren om hvordan ting bryder. Det er derfor nødvendigt at forstå de mest basale elementer af brudmekanikken, for at forstå CRC-teknologien, herunder den brudmekaniske designparameter "skørhedsmodul²". Det er en modellov som Bache har opstillet. Den fungerer som overordnet designredskab til design af CRC-materialer.

Brudformer

Der er to brudformer, som udgør grænsetilfælde for hvordan materialer bryder, det seje brud og det skøre brud.

Det seje brud

Det seje brud er karakteriseret ved en relativ stor plastisk deformation af konstruktionens materiale inden det endelige brud sker. Der er for det seje brud, i en konstruktion, et forvarsel om bruddet. Det betyder at det er muligt at ændre de forhold, hvorunder konstruktionen belastes inden et endeligt brud opstår.

Det skøre brud

Det skøre brud er karakteriseret ved en relativ lille plastisk deformation inden et endelig brud. Brudet sker uden forvarsel. Det sker ofte som følge af at konstruktionen har imperfektioner som revner, spændingskoncentrationer eller kærv.

Bærende konstruktioner skal have en sejt brudoptørsel, mens den skøre brudform er uacceptabel.

En konstruktions deformation og brudform er afhængig af konstruktionens tilstand³, konstruktionens størrelse, styrke,

brudenergi³, og elasticitetsmodul. Det er parametre Bache har samlet i det brudmekaniske designredskab "skørhedsmodul⁴".

Baches skørhedsmodul B

Baches Skørhedsmodul, B, er en dimensionsløs modellov. Den bruges som overordnet designredskab til design af materialer, der selv for ekstraordinært store og meget stærke konstruktio-
ner bibeholder den seje brudoptørsel.

Baches skørhedsmodul er en modellov, der inkluderer parametre, som har betydning for hvordan konstruktioner bryder. Det er parametrene:

$$\sigma_t = \text{Trækstyrke}^4, [\text{N/m}^2]$$

$$L = \text{Konstruktionselementets størrelse}, [\text{m}]$$

$$G = \text{Brudenergi}, [\text{N/m}]$$

$$E = \text{Elasticitetsmodul}, [\text{N/m}^2]$$

Baches Skørhedsmodul er udtrykt ved:

$$B = \sigma_t^2 L / EG$$

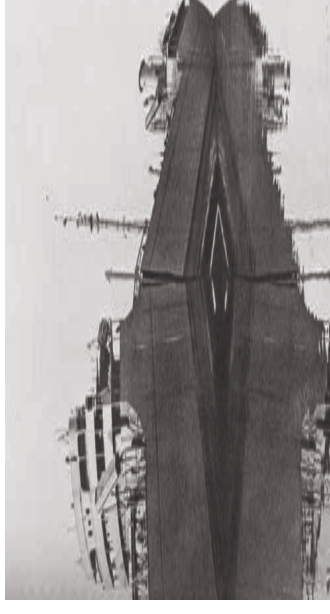
Jo større skørhedsmodulet B er jo mere skør bliver brudformen, jo mindre skørhedsmodulet er jo mere sejt bliver brudformen. Se figur 1 næste side.

CRC-materialer designes så skørhedsmodulet B forbliver så småt som muligt.

Design af CRC udfra skørhedsmodul

Med skørhedsmodulet er det muligt, i grove træk, at udvælge hovedarmering, fibre, partikler med videre. Udgangspunkt for design af CRC-materialer er konstruktionens størrelse, L.

Udfra konstruktionens størrelse L vælges med skørhedsmodulet armeringstype, størrelse og mængde, for sikring af sejt



Figur 1: Libertyskibene af stål knækkede midt over på grund af koldskørhed. (16)

brudoptørsel globalt i hele konstruktionen.

Efter valg af armeringstype anvendes skørhedsmodulet til at sikre sejt brudoptørsel omkring armeringer ved valg af fiber-mængde, størrelse og fibertype⁵.

Efter valg af fibre anvendes skørhedsmodulet til at sikre sejt brudoptørsel omkring fibre ved valg af tilslagsstype og tilslagsmængde⁶ og så fremdeles helt ned til valg af de mindste partikler i CRC-binderen.

Når CRC-materialer designes i forhold til konstruktionens størrelse er det CRC-materiale, der designes til den 100 meter store konstruktion altså ikke det samme som det, der designes til den 1 meter store konstruktion.

Note 1: Det seje brud er når konstruktionen deformeres plastisk før den bryder. Der opnås herved et forvarsel om at konstruktionen er ved at kollapse. Hvorfor det er muligt at reparere den inden.

Note 2: Om der er imperfektioner som for eksempel revner, kærv eller spændingskoncentrationer.

Note 3: Det arbejde, der skal til for at bryde noget.

Note 4: For konstruktioner, hvor der både er tryk og trækpåvirkninger, er det trækstyken der kalkuleres med når træksiden er svagere end tryksiden. For konstruktioner, hvor der kun er tryk er det trykstyken, der regnes med.

Note 5: Nu er formfaktoren L i Baches skørhedsmodul armeringens diameter D

Note 6: Nu er formfaktoren L i Baches skørhedsmodul fibreens diameter d.

Brudform ikke en materiale-egenskab

Materialer kan ikke betegnes som værende enten skøre eller seje. Brudformen afhænger af konstruktionens størrelse. Det kendes for eksempel fra glas. Glasvasen har en skør brudform, mens glasfiberen med meget mindre dimensioner (diametre), har en sej brudform.

Det kendes også fra stål. Det er muligt at anvende de meget stærke ståltyper med styrker på 2000MPa til kabler med relativt små diametre, mens de ikke kan anvendes til konstruktionsstål som har meget større dimensioner - de vil da få en skør brudform.

Af skørhedsmodul ses det at jo større en konstruktion er, størrelse, L , og materialets styrke, σ_t , er, jo større er skørhedsmodul og jo mere skør bliver brudformen.

Mens jo større materialets elasticitetsmodul, E , og materialets brudenergi, G , er jo mindre bliver skørhedsmodul og jo mere sej bliver brudformen. De tre af parametrene i Baches skørhedsmodul er **materialeparametre**:

$$\sigma_t = \text{Trækstyrke, [N/m}^2\text{]}$$

$$G = \text{Brudenergi, [N/m]}$$

$$E = \text{Elasticitetsmodul, [N/m}^2\text{]}$$

mens den sidste parameter er en **formparameter**:

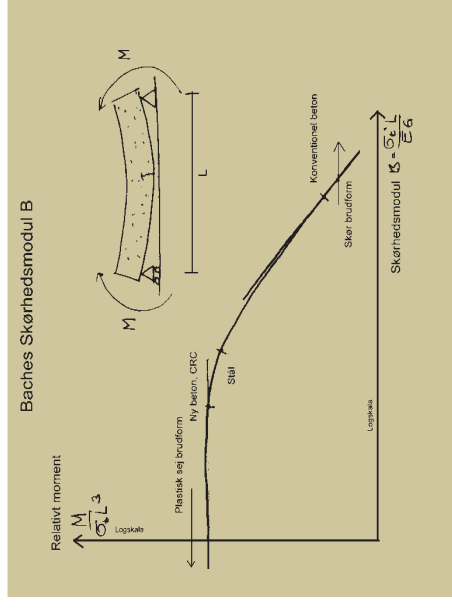
$$L = \text{Konstruktionselementets størrelse, [m]}$$

Ved at sammensætte CRC-materialer af forskellige delmaterialer kan de tre materialeparametre:

$$E, G \text{ og } \sigma_t$$

ændres.

Ønskes der for eksempel en meget stærk CRC, da er det nødvendigt at designe CRC-materialerne således at brud-



Figur 1: Grafisk gengivelse af Baches skørhedsmodul. Det relative moment, der er dimensionsløst, er afbildet som en funktion af Baches skørhedsmodul, der også er dimensionsløst. Af grafen ses at jo mindre skørhedsmodul er jo større er den relative bæreevne af bjælken. Der ønskes så lille et skørhedsmodul som muligt for at opnå størst mulig plastisk deformation i brud. (7)

energien G og elasticitetsmodul E er så store som muligt.

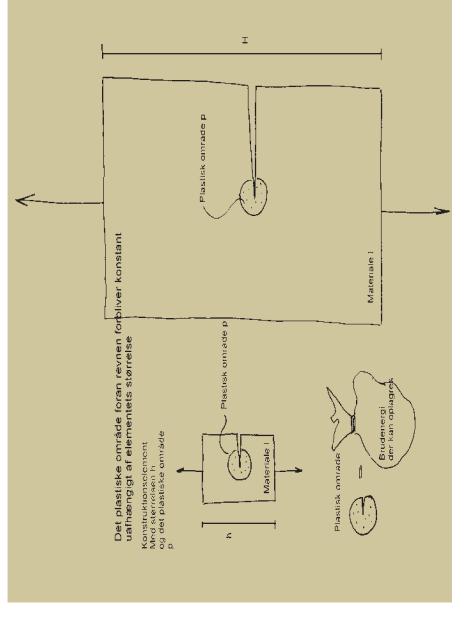
Design af CRC-materialer med stor brudenergi

Den brudenergi, som kan oplagres i en konstruktion afhænger af hvor stort et plastisk område, der er omkring en imperfektion.

Jo større det plastiske område er i forhold til konstruktionens udbredelse jo mere brudenergi kan der lagres. Se figur 2'.

Men det plastiske område foran en revne er en materialekonstans.

Det betyder at selvom det plastiske område foran en revne er relativt stort i forhold til konstruktionens udbredelse for den lille konstruktion, så vil det plastiske område foran den 100 gange



Figur 2. Et konstruktionselements brudform er afhængig af konstruktionselementets størrelse fordi det plastiske område foran en revne er konstant. Det betyder at når et konstruktionselement af materiale 1 forstørres 100 gange, da bliver det plastiske område foran revnen den samme og altså ikke også 100 gange større. .

store konstruktion af samme materiale, forblive det samme og derfor nu være relativt lille i forhold til konstruktionens udbredelse.

CRC-materialer designes så der er så stort et plastisk område som muligt uanset konstruktionens størrelse. Det opnås blandt andet ved at fordele brudzoner globalt i hele konstruktionen.

Note 1: Geometrisk Lige-dannede systemer. Det er ikke muligt på figur 2 at forstørre elementet 100 gange

Brudzoner

En konstruktion af konventionel armeret beton har, når den bryder, en lokal brudzone. Det er skitseret på figur 1, øverst for et konstruktionselement i træk. I det materiale bryder i denne lokale brudzone aflastes det resterende materiale. Det udnyttes altså ikke under brudet.

I CRC er der en global brudzone således at al materialet i en konstruktionen udnyttes under bruddet. I konstruktioner af CRC er der ultrafine revner fordelt i hele konstruktionen med hver deres plastiske område. Det betyder at konstruktioner af CRC får en global brudzone og en effektiv udnyttelse af al materialet i brudsituationer, figur 1, midte og nederst.

CRC-materialer har derfor langt større brudenergi, G, end konventionel armeret beton og også end stål¹.

Brudenergien for CRC-materialerne er imellem

$G = 2 \times 10^5 - 4 \times 10^6 \text{ N/m}$, mens den for konventionel armeret beton er $G=150 \text{ N/m}$ og for stål er $G=2 \times 10^5 \text{ N/m}$. (8).

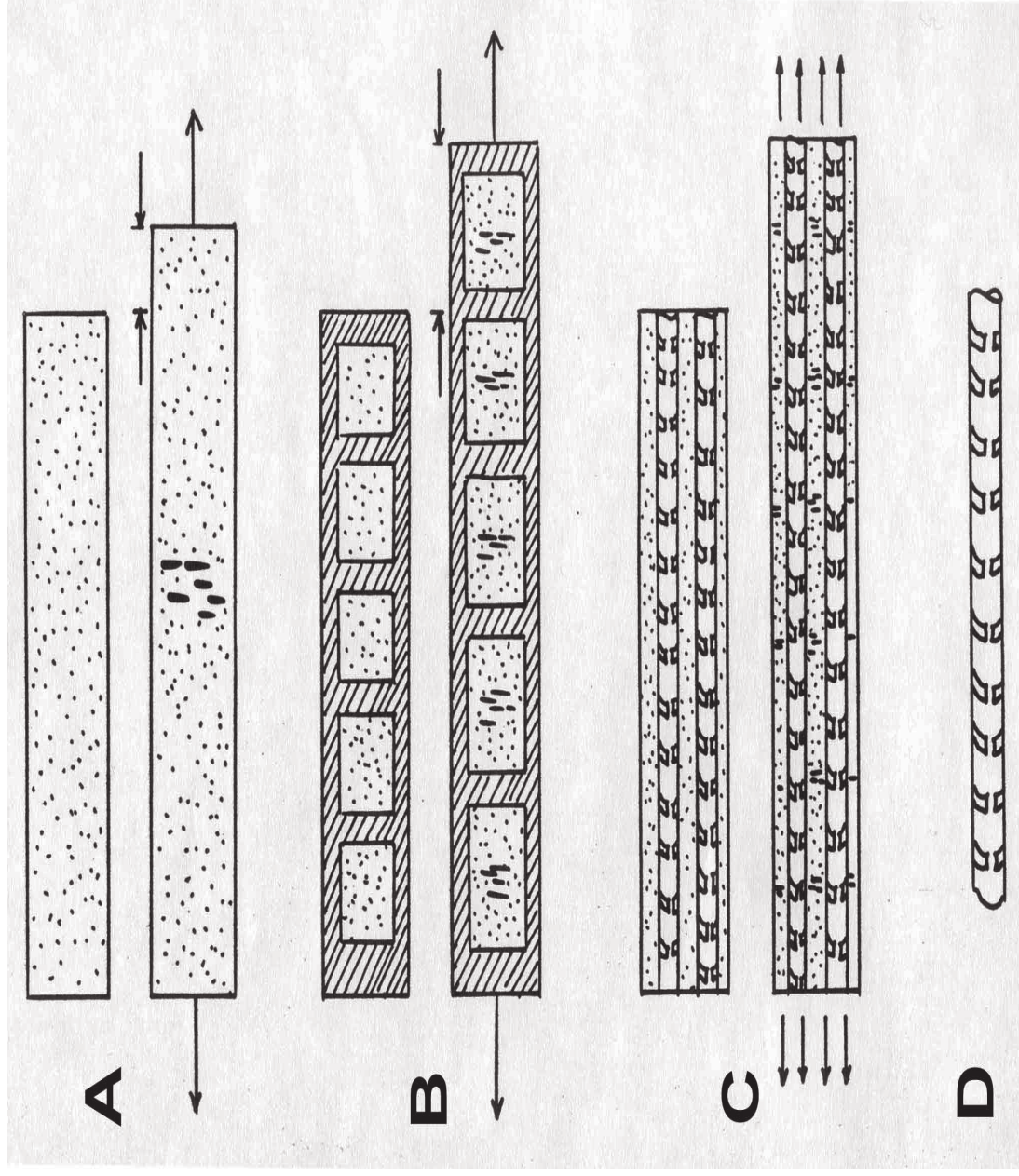
Den globale brudzone opnås i CRC ved at have relativt store volumenprocenter, tætplacerede armeringer, sådan som det er vist på figur 1 nederst.

For at opnå tilstrækkelig sejhed omkring de store volumenprocenter hovedarmering, vælges udfra skørhedsmodulet med armeringernes diameter som formfaktor D, fibertype, mængde og dimensioner.

Figur 1. A. I konventionel armeret beton er der en lokal brudzone -det resterende materiale er afløst. B. I CRC er der ved valg af armeringstype og mængde opnået en global brudzone, hvor ultrafine revner i brudsituationen er fordelt i hele konstruktionen. C. Det opnås ved at have rillede armeringer, samt relativt store volumenprocenter, således at disse ligger tæt og arbejder sammen med CRC-matricen.

D. Et eksempel på et armeringsjern i CRC.

Note 1: Selvom stål har en meget stor plastisk deformationsvej er den plastiske deformation først global, men sidenhen lokal, hvor så det resterende materiale afløstes.



Ved valg af fibre er der igen fokus på at opnå en stor brudenergi, G. Det gøres ved at vælge fiberlængde, fibrenes diameter, styrke og ved valg af volumenmængde fibre. Fibrene skal virke ved fiberudtrækning fremfor ved at bryde midt over, herved opnås stort brudenergi G.

For at opnå sejhed omkring fibre anvendes skørhedsmodul til valg af tilslag. Da er formfaktoren i Baches skørhedsmodul fibrenes diameter, d.

Design af CRC med stort

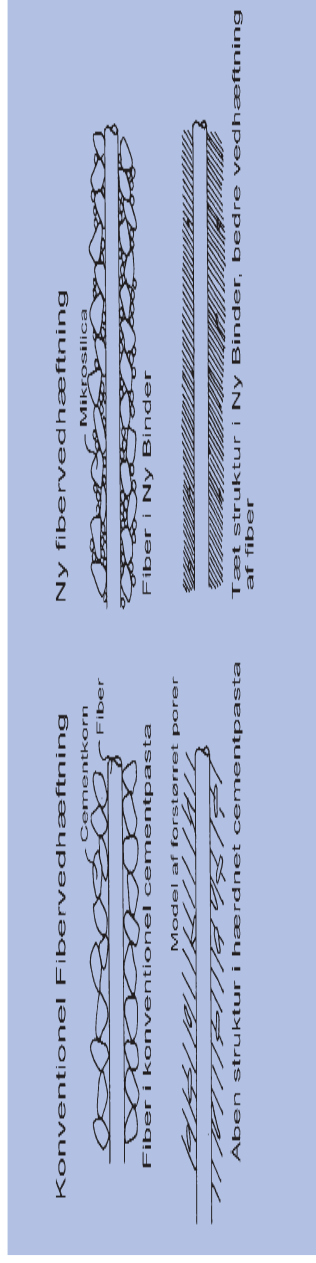
elasticitetsmodul

Tilslagsmaterialerne i CRC skal også være med til at sikre at der opnås så stort et elasticitetsmodul, E, som muligt. For Jo større elasticitetsmodul er jo mindre bliver skørhedsmodul B, jo sejere bliver brudformen. Så valg af tilslag skal foruden styrke, og lokal sejhed omkring fibre, vælges ud fra størrelse af elasticitetsmodul, E.

Binderen i CRC

Partikler i CRC-binderen skal foruden stor elasticitetsmodul ligeledes sikre lokal sej brudoptørelse omkring tilslaget og så fremdeles helt ned til de mindste partikler i binderen. Men derudover skal binderen i CRC-materialerne pakkes efter Densitstrategi. Det vil sige en så tæt pakning som muligt, med nogle stærke partikler så der opnås så stor styrke som muligt. I CRC-materialerne udvælges binderens partikler, deres dimensioner, geometri og styrke, altså både i forhold til CRC-teknologi og Densitstrategi.

I de CRC-materialer, som er testet eller anvendt i praksis er der inkoopereret op til 12 volumenprocent fibre og op til 20 volumenprocent trækarmering. I CRC er det muligt at



Figur 2. Fibrenes vedhæftning til binderen er langt bedre i Den Ny Betons binder end i konventionel betons binder, fordi der er en langt større pakningstæthed i Den Ny betons binder.

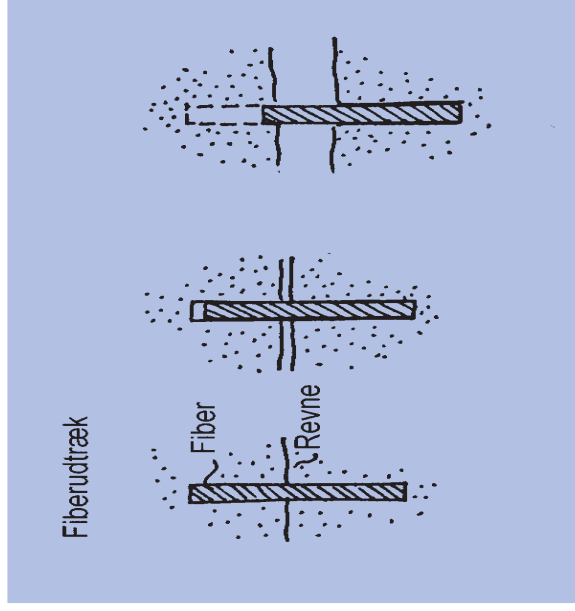
inkorporere og effektivt udnytte armeringswires med trækstyrker på 2000MPa¹.

Til sammenligning kan det nævnes at der i konventionel armeret beton anvendes op til ca. 2 volumenprocent fibre og op til omkring 4 volumenprocent trækarmering² og at armeringerne ikke må være stærkere end 550MPa. (19)

I det litteraturstudium undertegnede har gennemført omkring betoner og højstyrkebetoner er der ikke fundet tiltag som dem Bache anvender i CRC-teknologien, og der er ikke fundet materialer, der opnår lignende materialegenskaber, ekstraordinær stor sejhed, for ekstraordinære store konstruktioner, fremstillet af meget stærke materialer.

Noter: De wires i CRC som omtales er ikke for- eller efterspændt. Det kan dog også gøres såfremt det ønskes.

Note 2: Det lader til at den regel, der gælder for hvor meget armering, der kan inkoopereres i konventionel armeret beton, ukritisk er videreført, som en meget indgroet regel til højstyrkebetoners praksis. I hvert tilfælde er de højstyrke betoner undertegnede er stødt på, betoner der er armeret omtrent som konventionel armeret beton er armeret uanset konstruktionernes størrelser.



Figur 1. Fibrene i CRC skal dimensioneres efter og have en sådan styrke at de bliver trukket ud af CRC-matricen fremfor at knække midt over. Derved opnås størst brudenergi. Der er en relativ god vedhæftning af fibre i CRC-binderen, hvorfor der kræves et større arbejde for at trække fibre ud i CRC end for at bryde dem.

Den ny betons egenskaber

Den ny betontechnologi kan bruges til design af magnetisk beton, ildfast beton, (op til 1400 °C), frostsikkert beton (ned til -50 °C), "betoner" hvor 99% af cementen er erstattet af andre bindemidler. (8)

I denne gennemgang er det egenskaber som styrke, stivhed, densitet, deformationsopførsel, udmattelseegenskaber og modstand imod eksplosioner som beskrives.

Præsentation af mekaniske egenskaber

Den ny betons egenskaber og opførsel differentierer markant fra konventionel armeret betons og giver på visse områder lignelser til konstruktionsståls.

I skema 1 er angivet mekaniske egenskaber for CRC, men også for konventionel armeret beton, konventionel højstyrkebeton samt for sejt kvalitetsstål. Af skemaet ses det at der med CRC-teknologien kan opnås betoner med styrker op til 7 gange større end konventionel armeret betons og sammenlignelige med konstruktionsståls.

CRC kan have stivheder, (Elasticitetsmodul E), som er 2-3 gange større end konventionel armeret betons -op til det halve af ståls.

CRC er tungere end konventionel armeret beton - men vejer typisk en tredjedel til halvdelen af ståls vægt.

I praksis ruster hovedarmeringerne ikke i CRC på grund af den meget tætte struktur.

I modsætning til konventionel armeret beton er CRC frostsikker uden luftindblanding.

CRC's modstand imod brand er tæt forbundet med konstruktionsdesign og udtørring. CRC's brandopførsel kan således for nogle konstruktionsdesigns være bedre end kon-

	Konventionel høj-kvalitetsbeton	Ny beton		Sejt kvalitetsstål	Konventionel armeret beton
		Beton/matrixmateriale	CRC		
Trykstyrke	80	0-2% fibre	160-400	500	4-60
Trækstyrke (f_t)	5	120-270	100-300	~600	
Bøjningsstyrke* (f_b)		6-15	100-400		
Forskydningsstyrke*			15-150		
Densitet (ρ)	2500	2500-2800	2600-3200	7800	2500
E-modul (E)	50	60-100	60-110	210	17,5-30
Brudenergi	150	150-1500	5000-40000	2·10 ⁵	
Styrke/vægtforhold (f_v/ρ)				7,7·10 ⁴	
Stivhed/vægtforhold (E/ρ)				2,7·10 ⁷	
Frostbestandighed	moderat/god	absolut frostsikker – uden luftindblanding			
Korrosionsmodstand	moderat/god	korrosionssikker – selv med kun 5-10 mm dæklag			

ventionel armeret betons, mens det i andre tilfælde er påkrævet at bruge brandsikringsmetoder som vi kender dem fra brandsikring af stålkonstruktioner. (8)

CRC's deformationsopførsel

Når en konstruktion belastes vil den deformere. Hvordan og hvor meget den deformerer afhænger af hvilket materiale konstruktionen er lavet af.

Konstruktioner af CRC har unik deformationsopførsel. De kan således tåle relativt store deformationer uden at der opstår "revner" og kan ved aflastning stort set finde tilbage til udgangspositionen.

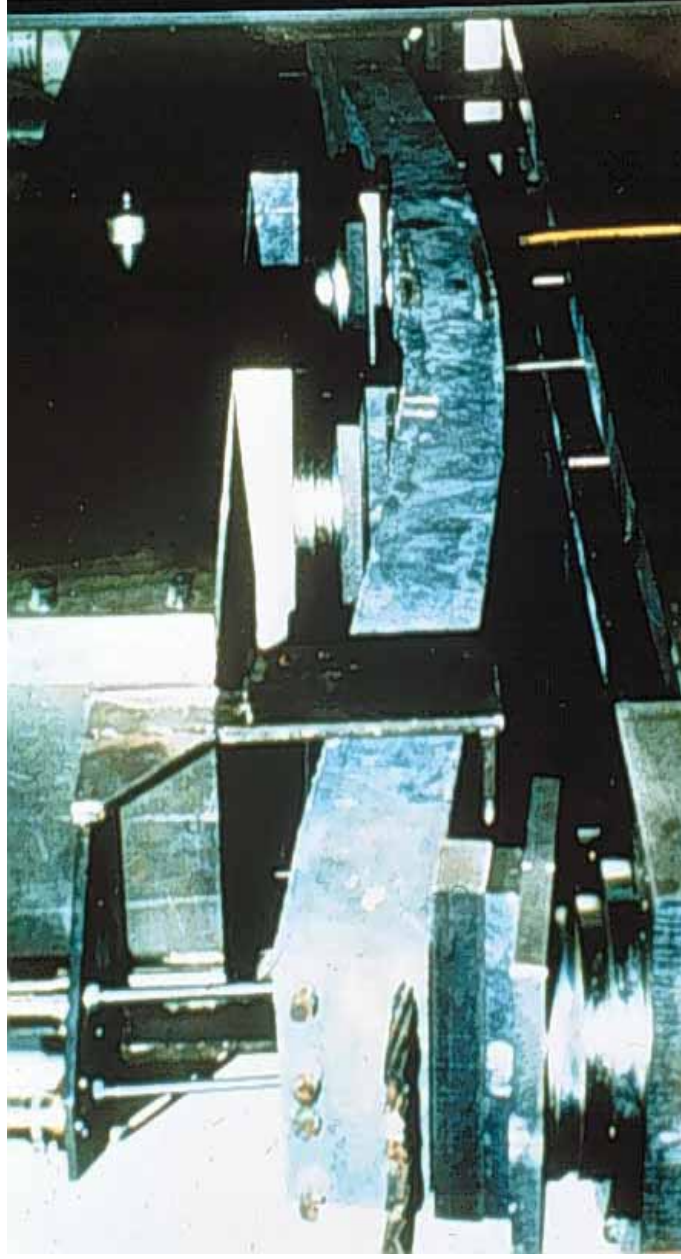
Et eksempel er vist på figur 1 næste side. Her ses en bøjningspåvirket CRC-bjælke som måler 95x150x2000mm. Ved testen, som ikke kunne føres til bjælkens brud på grund af

Skema 1. Mekaniske materialegenskaber for konventionel høj-kvalitetsbeton, ny beton, herunder CRC, for sejt kvalitetsstål og for konventionel armeret beton. Skemaet er taget fra Hans Henrik Baches piece „NY BETON NY TEKNOLOGI“(2), men er revideret idet data for den konventionelle armerede beton er indsat.

testudstyrets uformåen, måles spændinger svarende til en bøjningsstyrke på 327MPa. (8). Bjælkens maksimale vertikale deformation blev målt til 6 cm og der kunne ikke observeres "revner" hverken i tryk- eller trækssiden. Da bjælken blev aflastet, fandt den stort set tilbage til udgangspositionen for forstøget og havde kun en blivende deformation på 1 cm. (8).

Udmattelse

Belastninger af konstruktioner kan være statiske eller dynamiske. De styrker, der er angivet i skema 1 side, er for statiske



belastninger. Udsættes konstruktioner for dynamiske belastninger kan styrkeforholdene ændres markant.

Konstruktioners styrker falder generelt for gentagne belastninger, for eksempel lastcykler¹. Hvor meget de falder afhænger af om der er imperfektioner² i konstruktionen. I praksis vil der i store konstruktioner, specielt konstruktioner som er svejst sammen som broer, skibe og olietankere, altid være revner eller andre imperfektioner.

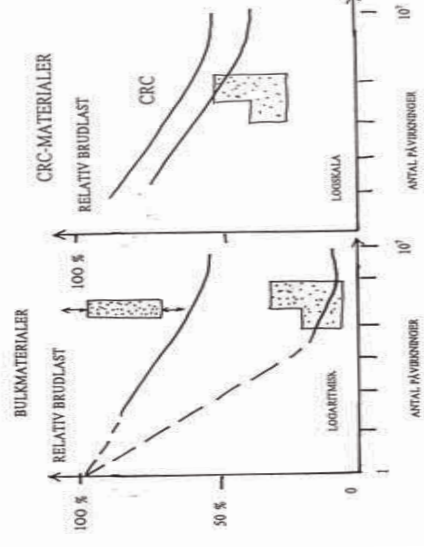
Perfekte konstruktioner³ kan tåle en svingende brudlast⁴ på 50-60 % af den statiske brudlast. (20). Se figur 2. Men for konstruktioner som har imperfektioner vil brudlasten, ved gentagne belastninger, formindskes markant ofte med skørt

Figur 1: En CRC-bjælke i en bæjningstest, som måler 9,5x150x2000mm. Bjælken har et stærkt tilslag og 9 volumenprocent stælfibre, (0,15x6mm), og er i træksiden armeret med ikke forspændte stælkabler med diameter 15 mm. Testen kunne ikke føres til brud.

brud til følge. (20). Det gælder for eksempel for store konstruktioner af de stærkere stål.

Denne følsomhed overfor imperfektioner har CRC ikke.

CRC bibeholder samme forhold imellem dynamisk og statisk brudlast selv når der er imperfektioner i emnet.



Figur 1: Bøjningsforsøg med CRC bjælke. Bjælken måler 95x150x2000mm. Bøjningsstyrken var svarende til 327MPa og der kunne ikke observeres 'revner'. Bjælken havde en vertikal deformation på 6 cm, men da den blev aflåst fandt den stort set tilbage til udgangspositionen og havde kun en blivende deformation på 1 cm. (8). (2) Figur 2: Realitv brudlast som funktion af antal svingninger. Udmåttelse for bulkmaterialer og CRC for perfekte elementer og for elementer med kær. (7)

Modstand imod stød, eksplosioner og stød hoveder

CRC's modstand imod store lokale stødpåvirkninger er unik. Det er vist ved flere forsøg, hvoraf de to nævnes her.

Ved Fraunhoit Institut i Tyskland er der lavet sprængningsforsøg med CRC. I forsøgene blev der også lavet sprængningsforsøg med konstruktionsstål og konventionel armeret beton for

Note 1: Lastcykler kan være varierende belastninger som belastning aflastning eller en variation imellem en tryk- og en trækbelastning.

Note 2: Imperfektioner kan være kær, revner eller spændingskoncentrationer

Note 3: Konstruktioner uden imperfektioner.

Note 4: Den last konstruktionen bryder ved.

at have noget at sammenligne med. CRC-pladen og pladen af konventionel armeret beton havde en tykkelse på 120 mm, mens den af konstruktionsstål, (Flydespænding 370MPa) var 70 mm tyk. Disse blev belastet med 300gram til 3kg plastisk sprængstof.

Resultatet af forsøgene er vist på figur 1 og 2.

CRC-pladen og pladen af konstruktionsstål som begge blev udsat for 3 kg sprængstof, deformeredes stort set ens. CRC pladen fik en lettere skade i overfladen, idet det dæklag, der ikke var forankret med armering, blev ødelagt. Stålbladen blev derimod ødelagt på dennes bagside, idet et relativt stort kugleformet stykke blev rekyløret af med stor hastighed under sprængningen. Ved sprængning af pladen af konventionel armeret beton blev armeringerne blottet for en meget mindre mængde sprængstof, 300gram, og betonen blev fuldkommen blæst væk, figur 1 og 2.

I et andet forsøg blev en 1 meter tyk CRC-plade og en plade af en stærk konventionel armeret beton med samme tykkelse, beskudt med en stålgranat på 45 kg, fra en kanon. Pladen af CRC og den af konventionel armeret beton bestod hver af 5 paneler som målte 150x150x20cm, figur 5.

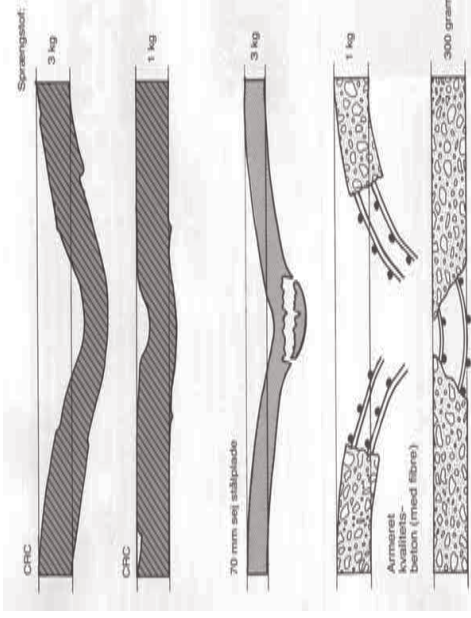
I forsøgene med CRC-pladen blev stålgranaten opfanget i de to første paneler, mens de resterende 3 paneler forblev intakte. På figur 7 ses stålgranatens bagende opfanget i det første CRC-panel.

I forsøget med den stærke konventionelle armerede beton fortsatte stålgranaten lige igennem de 5 paneler og forårsagede fuldstændig ødelæggelse af disse.

Fremstilling af konstruktioner i CRC

CRC-matricen

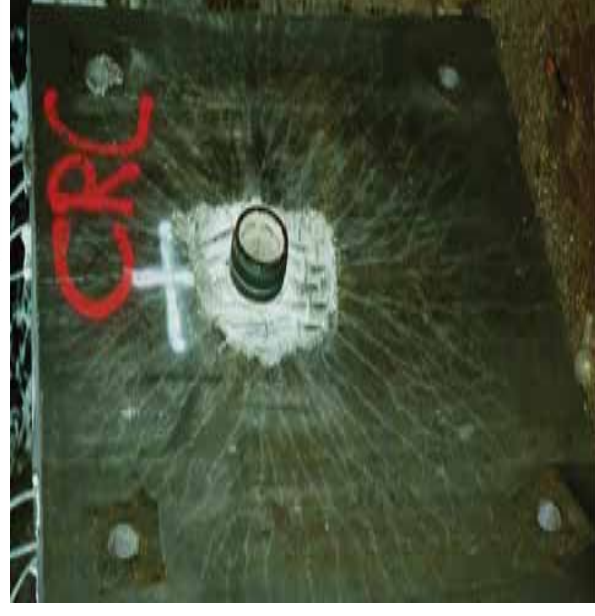
CRC-matricen - binder, tilslag og fibre- fremstilles i blandermaskiner ved stuetemperatur. Det kan foregå på fabrik



Figur 1: Principskitse af sprængningsforsøg

Figur 2: En stålblade med tykkelsen 70 mm, en CRC-plade og en plade af konventionel armeret beton, begge med tykkelsen 170 mm, som alle har været udsat for plastisk sprængstof. Stålbladene har været udsat for 3 kg sprængstof, mens den viste af konventionel armeret beton har været udsat for 1 kg (8), (2).

Figur 3, 4, 5 og 7. I forsøg hvor CRC-paneler blev beskudt af en stålgranat fra en kanon som var placeret 300 meter væk, blev stålgranaten opfanget i de to første CRC paneler, mens de resterende 3 paneler forblev intakte. I lignende paneler af stærk konventionel armeret beton, fortsatte granaten lige igennem og ødelagde fuldstændigt panelerne. Figur 3, 4, 5 og 6 viser henholdsvis kanonen og forsøgene, mens figur 7 viser stålgranatens bagende i det første panel af CRC. (3)



eller in-situ.

Den samlede blandings tid varierer fra 8-15 minutter. Det er mere end for konventionel beton, der som regel kun er på 1-2 minutter.

Fremstilling af CRC-matricen foregår ved:

1. at tøblande cement, tilslag, dispergeringsmiddel, m.v. i blandemaskinen 1-2 minutter.
2. at tilsætte vand, hvorefter der blandes yderligere 5-8 minutter og
3. så tilsættes fibre, hvorefter der blandes yderligere 2-5 minutter. (8).

I starten af blandingsprocessen er CRC-blandingen træg og tør at se på, trods det at vandet er tilsat. Den flydende tilstand opnås først relativt sent i blandingen.

CRC-konstruktioner

CRC-konstruktioner kan fremstilles ved processer som udstøbning, ekstrudering, påsprøjtning samt ved pressestøbning. Det mest anvendte er udstøbning i forme eller op ad forskalling, hvori hovedarmering er for-arrangeret.

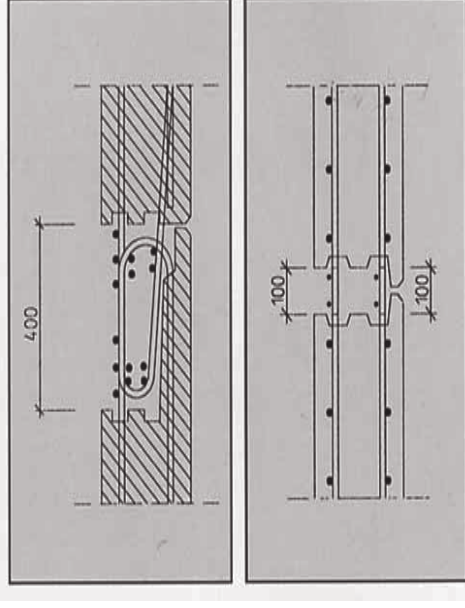
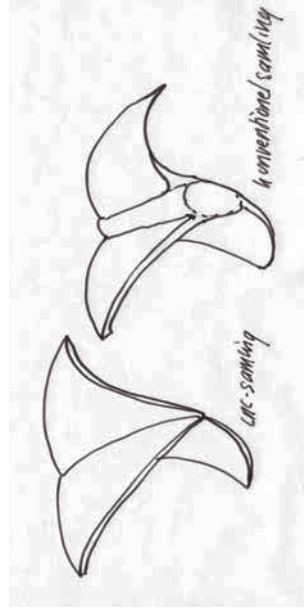
CRC-konstruktioner kan fremstilles på fabrik eller in-situ.

Under udstøbning, eller lige efter, skal CRC-matricen vibreres og komprimeres. Det kan foregå med en vibratormaskine eller for in-situstøbning med en stavvibrator.

Det tager 1-5 timer før CRC-matricen er størknet og det tager 28 døgn før den er hærdnet til den ønskede styrke.

CRC-samlinger

Med CRC teknologien kan der udføres nye slanke, stærke og brudseje samlinger, figur 1 og 2. Et eksempel er fugesamlingen CRC-jointcast, som er baseret på CRC-teknologi¹. Denne samlingsteknik har en mindre fugebredde end den konventio-



Figur 1: Samlinger med CRC kan være så slanke at de følger konstruktionens overordnede form. De kan være usynlig, hvor dem af den konventionelle armerede beton ofte forekommer som afbrydelser i den overordnede form.

Figur 2 og 4. Samling af søjle-pladekonstruktionssystem ved Aalborg universitetets 8. Byggesnit. Samlingen er med CRC-jointcast. (3).

Figur 3. Grafisk gengivelse af en konventionel fugesamling med konventionel armeret beton og den meget stærkere fugesamling CRC-jointcast. Bemærk den meget mindre fugebredde og de lige armeringer i CRC-jointcastsamlingen. (3).

Note 1: CRC-jointcast samlingen er baseret på CRC-teknologi og udviklet af Carl Bro A/S og Aalborg Portland A/S.

nelle fugesamling og der kan anvendes lige armering i modsætning til den buede armering i den konventionelle. CRC kan anvendes til samling af CRC-elementer, men også til samling af elementer af andre materialer, for eksempel konventionel armeret beton og konstruktionsstål.

Den Ny Betons anvendelser

Den ny betonteknologi er idag kommercielt tilgængelig og markedsføres af en række firmaer. De vigtigste nævnes her.

Densit A/S

Densit markedsføres af firmaet Densit A/S, der har 91 mand ansat, (2002), med koncentration omkring sikkerhedsindustri, gulve, pengeskabe og off-shore konstruktioner. (Densit A/S, www.densit.dk, P.O. Box 220, Dk-9100 Aalborg, 98 16 70 11).

Aalborg Portland A/S

Den ny betonteknologi blev opfundet af Hans Henrik Bache da han var ansat som seniorforsker ved Aalborg Portland A/S. Aalborg Portland A/S valgte i 1996, (da Bache blev pensioneret), 10 år efter at den ny betonteknologi, CRC, blev opfundet, at markedsføre CRC.

Der var to mand ansat i denne afdeling. Det var civilingeniør Jan Carlsen og civilingeniør Bendt Aarup. Afdelingen blev nedlagt i 2001 som følge af at Aalborg Portland A/S fremtidigt fokuserede på salg af cementfabrikker. (Aalborg Portland A/S, www.aalborg-portland.dk, Aalborg Portland A/S, Rørdalsvej 44, Postboks 165, DK - 9100 Aalborg, 98 16 77 77).

Contec Aps

Arkitekt Bo Servin, som tidligere har været ansat ved Densit A/S, har med den hollandske civilingeniør Peter Buitelaar oprettet

firmaet Contec ApS.

Contec ApS sælger materialer til fremstilling af CRC og er pionærer med hensyn til nye stærke materials praktiske, ingeniørmæssige anvendelser. Contec Aps er i disse år i samarbejde med Delfts Universitet i Holland og Den Hollandske stat, igang med nyskabende udviklingsprojekter, for eksempel udvikling af stål/CRC-hybridkonstruktioner til forstærkning af stålbroer.

(Contec ApS, bs@contec-aps.dk, Axel Kiær Vej 30, DK-8270 Højbjerg, 86 72 17 23).

Hi-Con Aps

Civilingeniør Jan Carlsen oprettede, efter lukningen af afdelingen CRC på Aalborg Portland A/S, firmaet Hi-Con Aps, som idag er storproducent af slanke CRC-elementer, for eksempel trapper og altaner.

(Hi-Con ApS., www.hi-con.dk, Gørtelvej 8, DK-9320 Hjallerup, 98 28 37 10)

CRC-technology ApS

Civilingeniør Bendt Aarup oprettede firmaet CRC-technology, der sælger og markedsfører speciel cement til CRC-materialer¹. (CRC-Technology, www.crc-tech.dk, Østermarken 119, DK - 9320 Hjallerup)

Anvendelser indtil videre

CRC er anvendt indenfor en række forskellige områder, nogle af dem nævnes her.

Figur 1: Vindeltrappe i CRC fra et kontorbyggen i Tuborg Havn. Arkitekter: Arkitema. Entreprenør NCC Danmark. Ingeniører Rambøll A/S. Produktion og montering Beton-tegl A/S. (3)

Note 1: CRC-technology har en meget informativ hjemmeside omkring den ny betonteknologi.



Husbygningsområdet

Indenfor husbygningsområdet er CRC anvendt ved konstruktioner som trapper, altaner, søjler, bjælker og stærke samlinger af præfabricerede betonelementer. Nogle eksempler følger.

Vindeltrappe i kontorbygning

I Tuborg Havn har arkitektfirmaet Arkitema tegnet en udfordrende vindeltrappe i CRC, figur 1 forrige side. Trappen har en diameter på 6 meter. Der er en enkelt vange. Trinene er udkragede fra vangen. Trinitykkelsen er 30mm yderst, mens de tiltager i tykkelse ind mod vangen til 100mm. Trappen er udført som elementer og samlet med CRC jointcast-samling på stedet.

Trapper og gangbroer

1. I indgangspartiet til Aarhus Familie- og beskæftigelsesforvaltning har arkitektfirmaet 3xNielsen tegnet trapper og gangbroer af CRC i bedste Piranæsi-stil.

Trapperne er udført med en central vange.

trinene er længst væk fra vangen 35mm.

Gangbroerne har en forspændt bærende bjælke i konventionel armeret beton, mens de tynde plader er støbt i CRC og fastgjort med CRC-jointcast.

Figur 1: Trappe og gangbro i CRC tegnet af 3xNielsen. Familie- og Beskæftigelsesforvaltningen i Aarhus. Produceret af Beton-Tegl. NCC var entreprenør. (3)

Figur 2 og 3: CRC-Trappe og gangbro i biblioteket i Roskilde Universitet. Tegnet af Henning Larsens Tegnestue. PL Beton var producent, mens Jorton var entreprenør. (3)

Figur 4: Altan og altangange i CRC leveret af Hi-Con ApS til boligbyggeri Lindholms Brygge, Nørresundby. Design Arkitekterne Venndt og Carl Bro AS var rådgivere. (3)



Se figur 1 forrige side.

2. I biblioteket ved Roskilde Universitet har Henning Larsens Tegnestue tegnet en CRC-trappe og gangbro. Se figur 2 og 3 forrige side. Trappen er støbt som elementer og samlinger er lavet in-situ med CRC-jointcastsamling.

Altaner

1. Hi-Con Aps har leveret 1200m² altaner og altangange i CRC til Sundby-Hvorup Boligforening, Lindholms Brygge i Nørresundby. De er tegnet af Arkitekterne Venndt. Se figur 4 forrige side.

2. Hi-Con Aps. har også leveret 80 altaner og altangange til et nybyggeri for Roskilde Boligselskab i Trekroner. Hi-Con ApS har i samarbejde med Arkitektgruppen Aarhus og Rambøll i Køge designet en løsning som enkelt kan monteres med andre beton-elementer ved indspænding i vægelementerne, figur 3 og 4.

3. I Silkeborg har Hi-Con ApS leveret udkragede og simpelt understøttede altaner og altangange i CRC.

Rådgiver var DAI Gruppen, mens Silkeborg og Ringsted Bygningsentreprise forestod montagen af elementerne, figur 1 og 2.

Samlinger

CRC-jointcastsamlingen er anvendt i mange sammenhænge. Ved Jutlandia Ny Dørfabrik i Sdr. Felding er samlingsteknikken brugt til at samle præfabricerede søjler og bjælker af konventionel armeret beton. Samlingerne er lavet for at gøre rammerne nemmere at transportere. Carl Bro A/S har designet rammerne og samlinger, figur 5 og 6.

Byggesektoren

CRC er anvendt indenfor byggesektoren. Nogle eksempler gives



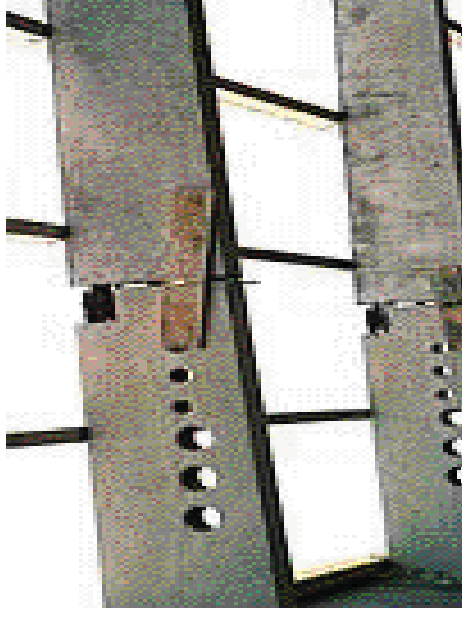
Figur 1 og 2: Altaner og altangange i CRC udført af Hi-Con ApS. DAI Gruppen var rådgiver, mens Silkeborg og Ringsted Bygningsentreprise forestod montagen. (3)

Figur 3 og 4: Boligbyggeri i Trekroner med CRC-altaner og altangange udført af Hi-Con ApS., tegnet af Arkitektgruppen Aarhus og Rambøll som rådgiver. Entreprenør var MAS entreprisse. (3)

i det følgende.

Dæksler til Storebæltstunnelen

Indenfor byggesektoren er 40.000 CRC-plader anvendt i Storebæltstunnelen over kabelgange, figur 1 og 2 næste side. CRC-dækslerne har en tykkelse på 40mm og et dæklag til armeringerne på 10mm. De er beregnet til at kunne klare belastning fra overkørende tog og tæring fra et meget aggressivt miljø i over 100 år.



Figur 5 og 6: Rammesamling med CRC-jointcastsamling på Jutlandia Ny Dørfabrik i Sdr. Felding. Carl Bro designede rammer og samlinger, der blev produceret af Cementstøberiet „MORSØ“. Rambøll var bygherrens rådgivere. (3)

CRC-dækslerne erstattede de støbejernsdæksler, der var påtænkt først. Dels fordi CRC-dækslerne var en billigere løsning, dels fordi der med dækslerne af støbejern opstod problemer med de elektriske installationer. (12)

Forstærkning af stålbroer.

CRC er også anvendt som forstærkning af stålbroer, hvor det sammen med stålplader danner stærke, seje og lastbærende stål-CRC-hybridstrukturer. Firmaet Densit har med Cowi Consult opført en sådan bro i Østen, mens firmaet Contec APS i samarbejde med Delfts Universitet, har anvendt princippet til forstærkning af broer i Holland, figur 3.

Anlægs- og maskinsektoren

CRC har vundet størst indpas indenfor anlægs- og maskinsektoren.

Forstærkning af flydedok i stål

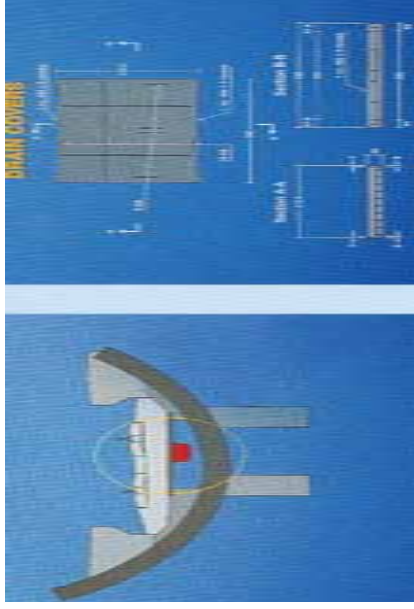
CRC er for eksempel anvendt som forstærkning af en flydedok i stål, med et princip, der på mange måder minder om princippet med CRC-forstærkning af stålbroer.

Transportnegle i CRC

CRC er også anvendt til fremstilling af 3-4 meter store transportnegle til cementmøller. Transportneglene af CRC er specielt designede til at modstå store slidpåvirkninger, der var et kæmpeproblem med de tidligere snegle af støbestål. Transportneglene af CRC holder i 5-10 år, mens dem i støbestål kun holdt 1/2 til et helt år. (8)

Presseværktøjer i CRC

CRC er ligeledes anvendt til meterstore presseværktøjer til formpresning af emner, karosseriplader, i stål. Værktøjerne er opbyggede som hybridstrukturer med frontskal i



Figur 1 og 2. CRC er anvendt til 40.000 dæksler i Storebæltstunnelen. (4)

Figur 3. Klaagbruggen i Holland forstærkes med præfabrikerede CRC-plader. Et projekt som Contec APS, den hollandske stat og Delfts Universitet deltog i. (5)

Figur 4. Tunnelføring med CRC. (4)

Figur 5. Indløbskovi til cementmøller i CRC. (2)

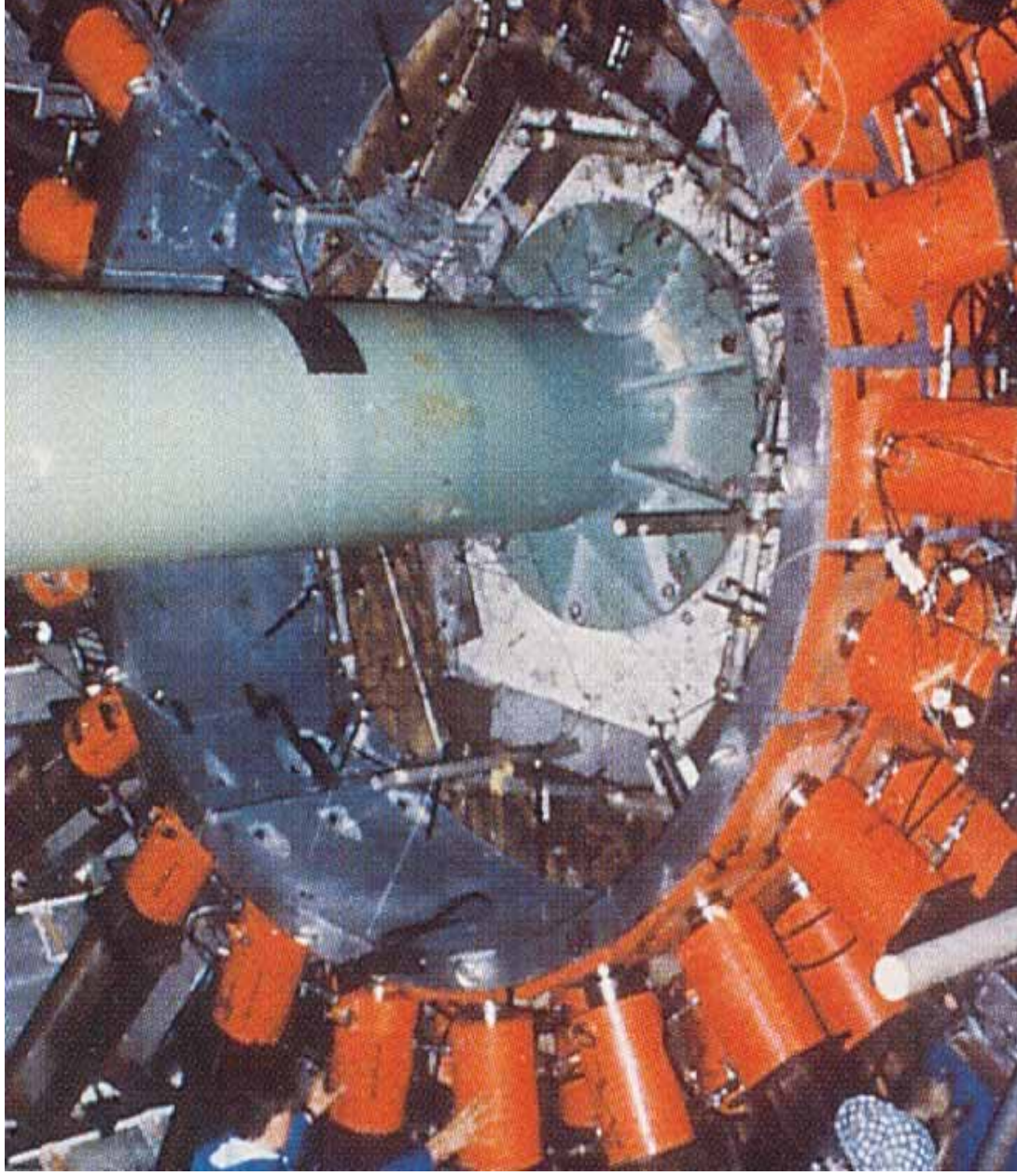
galvanoudfældet nikkel, bagstøbt med CRC.

Off-shore industrien

Indenfor off-shoreindustrien er CRC anvendt til forstærkning af boreplatformes store bærende hovedkonstruktioner og ved udstøbning på havbunden til forstærkning af rørledninger af stål.

Sikkerhedsindustri

Indenfor sikkerhedsindustrien har CRC vundet udbredelse over hele verden til pengeskabe og større beskyttelsesanlæg i banker, med videre.



Figur 1. Storskala test af CRC-konstruktioner til off-shore. (4)

DEN NY BETONS FORM

If you think of a brick, and you are consulting the orders, you consider the nature of brick, you say to brick "what do you want brick?" Brick says "I like an arch" If you say to brick "Arches are expensive and I can use concrete lintel over an opening. What do you think of that brick? Brick says "I like an arch" : it is important that you honour the materials you use, you dont bandy it about as though to say "Well, we have a lot of material, we can do it one way, we can do it another way". It's not true. You must honour and glorify the brick instead of shortchanging it and giving it an inferior job to do in which it loses its character, as for example, when you use it as an infill material, which I have done and you have done. Using brick so makes it feel though it is a servant, and brick is a beautiful material.
Kahn, Louis I., 1973. (1).

Indledning

Den ny betons form præsenteres.
Først indkredses det designforum, som har været udgangspunkt for indkredningen af den ny betons formverden.
Derefter vises eksempler -visioner- for denne formverden ved skitser og billeder af modeller.

Designforum

Der er opfundet en ny betonteknologi. Den har arkitektoniske potentialer både for mindre konstruktioner, men også for de kæmpestore. Her gives visioner for hvordan kæmpestore konstruktioner i ny beton kan formgives, for at artikulere den ny betons unikke egenskaber og arkitektoniske formmæssige egenart.

Formgivningen har taget afsæt i et relativt snævert designforum, som er opstillet på basis af:

1. Konstruktionens funktionskrav -sikkerhed, holdbarhed og komfort
2. Konstruktionens skala -de kæmpestore konstruktioner og dens
3. Materiale -den ny beton

Konstruktionens funktionskrav

De konstruktioner som berøres indgår i det fiktive byggeri. Det er et byggeri, som er frataget den kontekst det virkelige byggeri altid står i. Det fiktive byggeri ansues alene som konstruktion. Konstruktionen i det fiktive byggeri skal leve op til holdbarhed, sikkerhed og komfort¹, mens specifikke brugsrelaterede funktionskrav som rumfordeling, lysætning, handicaptilgængelighed med videre, ikke indgår i betragtningerne.

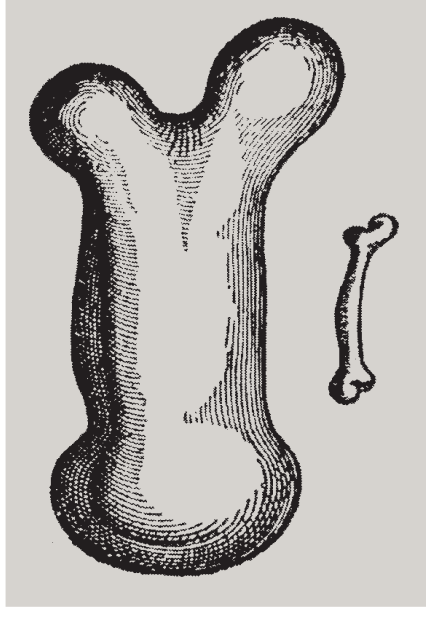
Konstruktionens primære funktion i et fiktivt byggeri er at føre belastninger, derfra hvor de virker, til jorden.

Konstruktionens skala

Konstruktionens skala influerer på dens form. Det var et aspekt som Galileo Galilei omtalte allerede i 1638 i dennes "Two New Sciences", (23):

Clearly then if one wishes to maintain in a great giant the same proportions of limb as that found in an ordinary man he must either find a harder and stronger material for making the bones, or he must admit a diminution of strength comparison with men of medium stature; for if his height be increased inordinately he will fall and be crushed under his own weight. (Galileo Galilei 1638)

En konstruktions egenvægt vokser ved en opskalering proportional med konstruktionens volumen med en faktor i tredje potens, n^3 , mens konstruktionens bæreevne vokser proportionalt med konstruktionens tværsnit med en faktor i anden po-



Figur 1. Ben forstørret 3 gange ifølge Galileo Galilei (8)

tens, n^2 . Derfor vil nogle konstruktioner, som kæmpens skelet i Galileo Galileis tilfælde, ved en opskalering kollapse under egen vægt.

For at undgå et kollaps ved en opskalering kan det være nødvendigt at erstatte et svagere materiale med et stærkere eller at forstørre nogle dimensioner mere end foreskrevet ved opskaleringen.

Ved sidstnævnte løsning medfører opskaleringen ændret form -fra den relativt slanke menneskekogle til den kraftigt udseende, plumpe kæmpekogle.

De konstruktioner som behandles her er kæmpestore. De har spændvidder og højder imellem 500 og 1000 meter -den kæmpestore skala.

Note 1: Komfort er her relateret til deformation - nedbøjning, udbøjning eller svingning- som følge af en belastning

Materiale

Den ny beton har styrker som er 5-7 gange større end konventionel armeret betons og som er sammenlignelige med konstruktionsstål. Den har stivheder, som er 2-3 gange større end konventionel armeret betons - op til det halve af ståls. Den ny beton er lidt tungere end konventionel armeret beton - vejer typisk en tredjedel til halvdelen af ståls vægt.

Med den ny beton kan der formes kæmpekonstruktioner som ikke lader sig opføre med konventionel armeret beton. De kan være meget længere og slankere og med meget mindre godstykkelser. De kæmpestore konstruktioner af den ny beton kan formes med længder, slankheder og godstykkelser, som er sammenlignelige med dem af konstruktionsstål, men med mindre vægt og der vil ikke være de samme velkendte revneproblemer og udmattelsesproblemer omkring svejsninger med videre, som der er for konstruktionsstål.

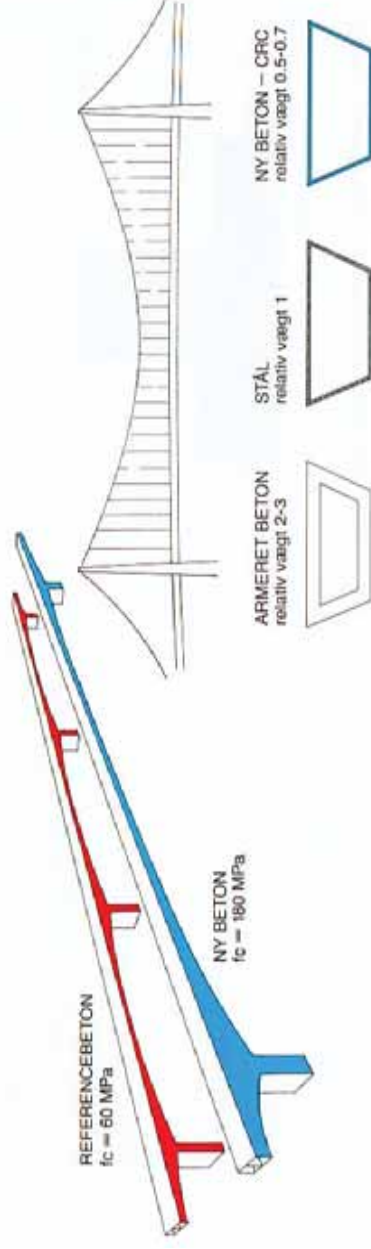
Det betyder at der hvor konventionel armeret beton vrages til fordel for konstruktionsstål, fordi grænsen for hvad konventionel armeret beton kan bære er nået, der kan den ny beton med fordel tages i betragtning.

Den ny beton har langt større brudenergi, G , end konventionel armeret beton og også end stål. Brudenergien for den ny beton er imellem $G = 2 \times 10^5$ - 4×10^6 N/m, mens den for konventionel armeret beton er $G=150$ N/m og for stål er $G=2 \times 10^5$ N/m. (8).

Det bevirker at der med den ny beton er stor formfrihed i forhold til hvordan forskellige udformede elementer sammensættes.

For eksempel kan en kæmpekonstruktion bestå af massive elementer kontinuert forbundet med tyndplade profiler og diskrete profiler – uden at der opstår de samme lokale revnedannelser, lokal skør brudform og store udmattelsesproblemer som der haves med konventionel armeret beton og konstruktionsstål.

Den ny betons unikke brudmekaniske egenskaber fører også til



Figur 1: Eksempel på hvorledes spændvidden på en bro kan øges med den ny beton.(2)

Figur 2: Eksempel de vægforhold der kan være for ny beton. (2)

1. Præfabrikerede elementer
2. In-situstøbte elementer

3. Forskellige ny betoner, for eksempel den uarmerede, den relativt svage, en armeret, en forspændt, med videre og alligevel få det til at se ud som om der er tale om det samme materiale, og at kæmpekonstruktionen er støbt ud i én kontinuerlig ikke afbrudt proces.

Ud fra disse funktionskrav, den konkrete skala og ud fra ønsket om at artikulere den ny betons unikke egenskaber og arkitektoniske egenart mest muligt, er der opstillet et designforum:

kæmpekonstruktioner i ny beton bør formgives så den ny betons:

1. **relativt store styrker, stivheder og relativt lave vægt**
2. **unikke brudmekaniske egenskaber**
3. **fremstillingsprocesser og samlingsteknikker og / eller**

stor formfrihed med hensyn til udformning af de enkelte konstruktionselementer. For eksempel kan en kæmpekonstruktion være opbygget af diskrete profiler, der indenfor samme profilelement, går fra at være relativt kraftige til at være helt slanke. Tilsvarende profiler af konventionel armeret beton kan ikke blive ligeså slanke som dem af den ny beton, mens dem af konstruktionsstål ikke kan blive ligeså kraftige.

Den ny beton har unikke udmattelsesegenskaber og modstand imod udeklima og slid. Konstruktioner i den ny beton kan fremstilles ved præfabrikation og/eller in situ. Den mest almindelige fremstillingsform er udstøbning i form eller op af en forskalling. Det bevirker at den ny beton kan formgives plastisk skulpturelt, men også geometrisk stramt med former som er konvekse, konkave, dobbeltkrumme, retvinklede, plane, organiske, amorfé, med videre .

For samling af præfabrikerede elementer er det muligt at samle disse med nye stærke, slanke og elegante samlingsteknikker. Det er samlinger som kan være synlige eller ikke synlige efter valg. Det giver mulighed for at udforme kæmpekonstruktioner i

4. gode slidegenskaber og modstand imod udeklima udnyttes bedst muligt

Hvad det betyder for formgivningen forsøges forklaret og vil forhåbentligt fremgå af de modeller og skitser, der vises efterfølgende.

Udnyttelse af den ny betons relativt store styrker, stivheder og relativt lave vægte

For at udnytte den ny betons relativt store styrker, stivheder og relativt lave vægte – bør kæmpekonstruktioner i ny beton udformes med stort rumligt, men hult, fylde- med minimeret materialeforbrug.

Det kan gøres ved at forme kæmpekonstruktioner som:

- Hule mere eller mindre lukkede beholdere opbygget af slanke flader, skaller eller profiler.
- Diskrete slanke elementer- der er forbundet indbyrdes så de statisk virker sammen som ét samlet rumligt system

Analysen har peget på at den rumlige fylde, der kræves for at udnytte den ny betons styrker og stivheder fuldt ud, er meget mindre end for konstruktioner i konventionel armeret beton og sammenlignelig med dem af konstruktionsstål. (2)

Udnyttelse af den ny betons unikke brudmekaniske egenskaber.

For at udnytte den ny betons unikke brudmekaniske egenskaber skal formgivningen tage afsæt i at der med den ny beton er store frihedsgrader i forhold til:

- Hvordan forskellige elementtyper –profilen, fladen, med videre- sammensættes
- Hvordan forskelligt udformede elementer sammensættes
- Hvordan og hvor meget elementer kan perforeres i overfladen
- Hvor meget godstykkelse kan variere og hvordan over-

gangen imellem de forskellige godstykkelser udføres

Udnyttelse af de processer, hvormed den ny beton bearbejdes
For at udnytte den proces, hvormed den ny beton bearbejdes til kæmpekonstruktioner, samt de samlingsteknikker i ny beton, der er udviklet, skal formgivningen tage afsæt i at:

- Den ny beton som følge af at den oftest støbes i en form eller op af en forskalling- åbner op for et rigt varieret formsprog, som spænder fra det skulpturelt plastiske- til det stramt geometriske. Formsproget kan i sin bredde anvendes i hver sin kæmpekonstruktion, men også i den samme.
- Den ny beton åbner op for en artikulering, der spænder fra volumenet, fladen og profillet – noget der som regel i disse skalaer kun opnås ved at kombinere flere materialer i en konstruktion.
- Den ny beton byder på valg af synlige eller usynlige samlinger og åbner dermed op for varieret artikulering –en kæmpekonstruktion kan se ud som om den er støbt monotont ud i ét, eller at den er samlet af delelementer- uafhængigt af de faktiske fremstillingsforhold.

Udnyttelse af den ny betons gode slidegenskaber og modstand imod udeklima

For at udnytte den ny betons gode slidegenskaber og modstand imod udeklima bør formgivningen af kæmpekonstruktioner i ny beton tage afsæt i at:

- Den ny beton kan bruges til både fundament, belægning og bygningstroppe
- Og at kæmpekonstruktioner i ny beton kan være placeret på land, men også i vand.

Visioner for en ny betons formverden

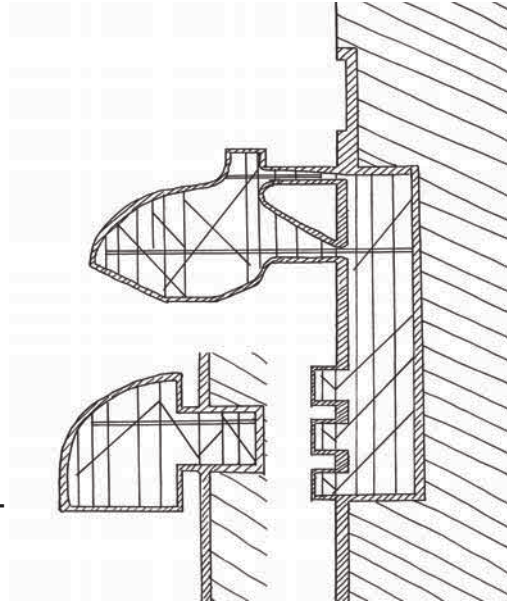
Ud fra det opstillede designforum er der udarbejdet modeller og skitser. De vises i det følgende.

Modelerne er udført i gips, pap og træ. De måler 30-100 cm, men repræsenterer visioner for formgivning af kæmpestore konstruktioner i ny beton med spændvidder på 500-1000 meter. Modelerne og skitserne er lavet ud fra et konkret teoretisk designforum - men afspejler i høj grad også en kunstnerisk trang. Som indledning til præsentationen af hver model og dertil hørende skitser, opridses, i en kort tekst, de designprincipper, der er anvendt. Ellers får modelerne og skitserne lov til at stå stumt uden følgeskab af yderlig omfattende og forklarende tekst -de er som synsbilleder for ideer. Modelerne og skitserne er ikke oplæg til færdige arkitektoniske værker med en evigheds-værdi, men derimod oplæg til et visuelt erkendelsesrum, der er rettet imod oplevelse, sansning og følelse af den ny betons egenartede karakter og rumskabende arkitektoniske potentialer. Neal Armstrongs sagde „One step on the moon a giant step for mankind (1969, Neil Armstrong) da han landede på månen i sin tid. På tilsvarende måde, dog med en langt mindre skridtlængde, håber jeg at dette projekt kan være med til at der i fremtiden tages et skridt på den ny betonteologiske udviklingsvej imod implementering i arkitektonisk udfordrende byggeri.

Model 1

Den ny betons form

Kæmpekonstruktion 1

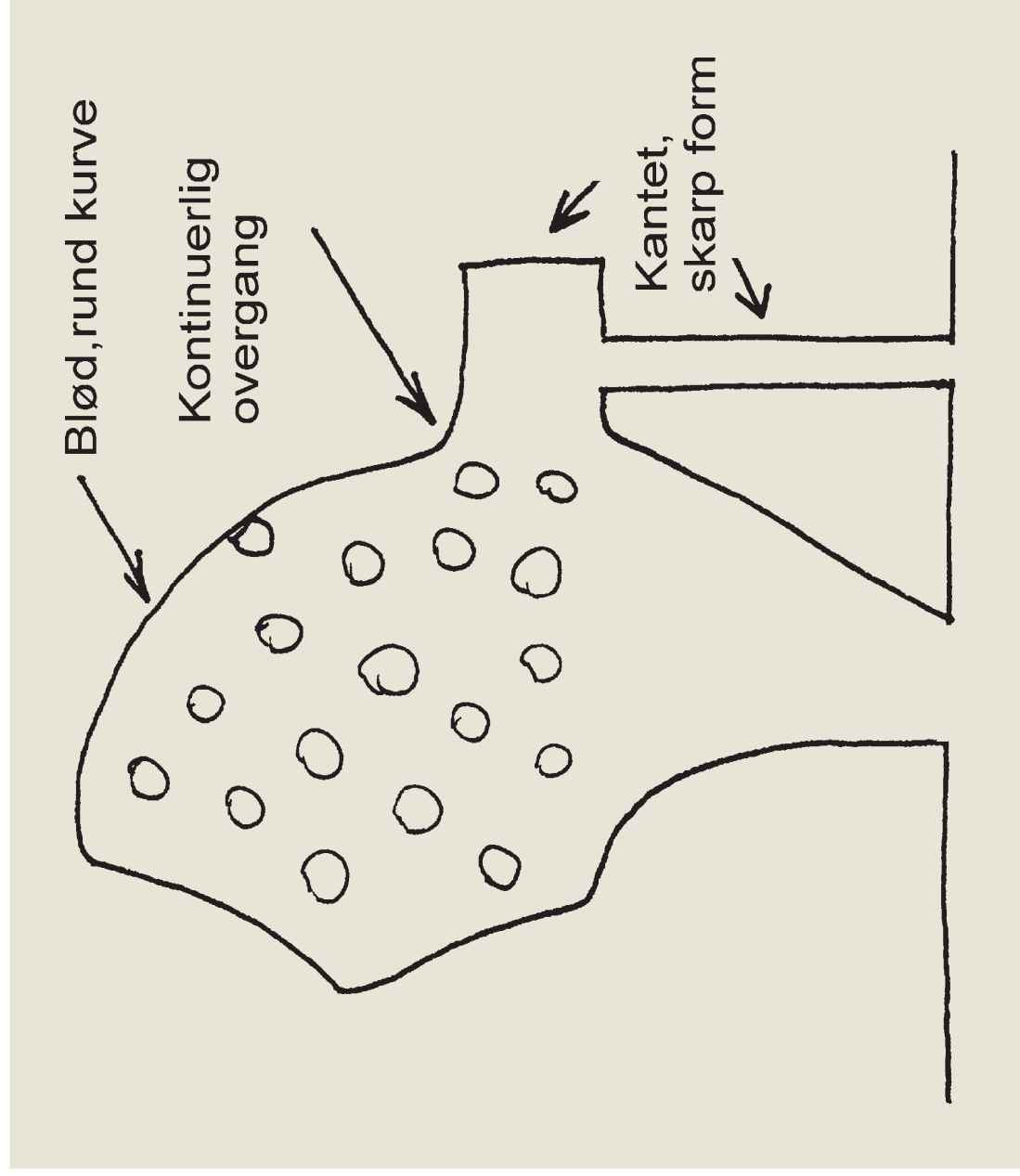


Model 1 består af beholdere, fundamenter og en belægning, som alt sammen tænkes udført i ny beton.

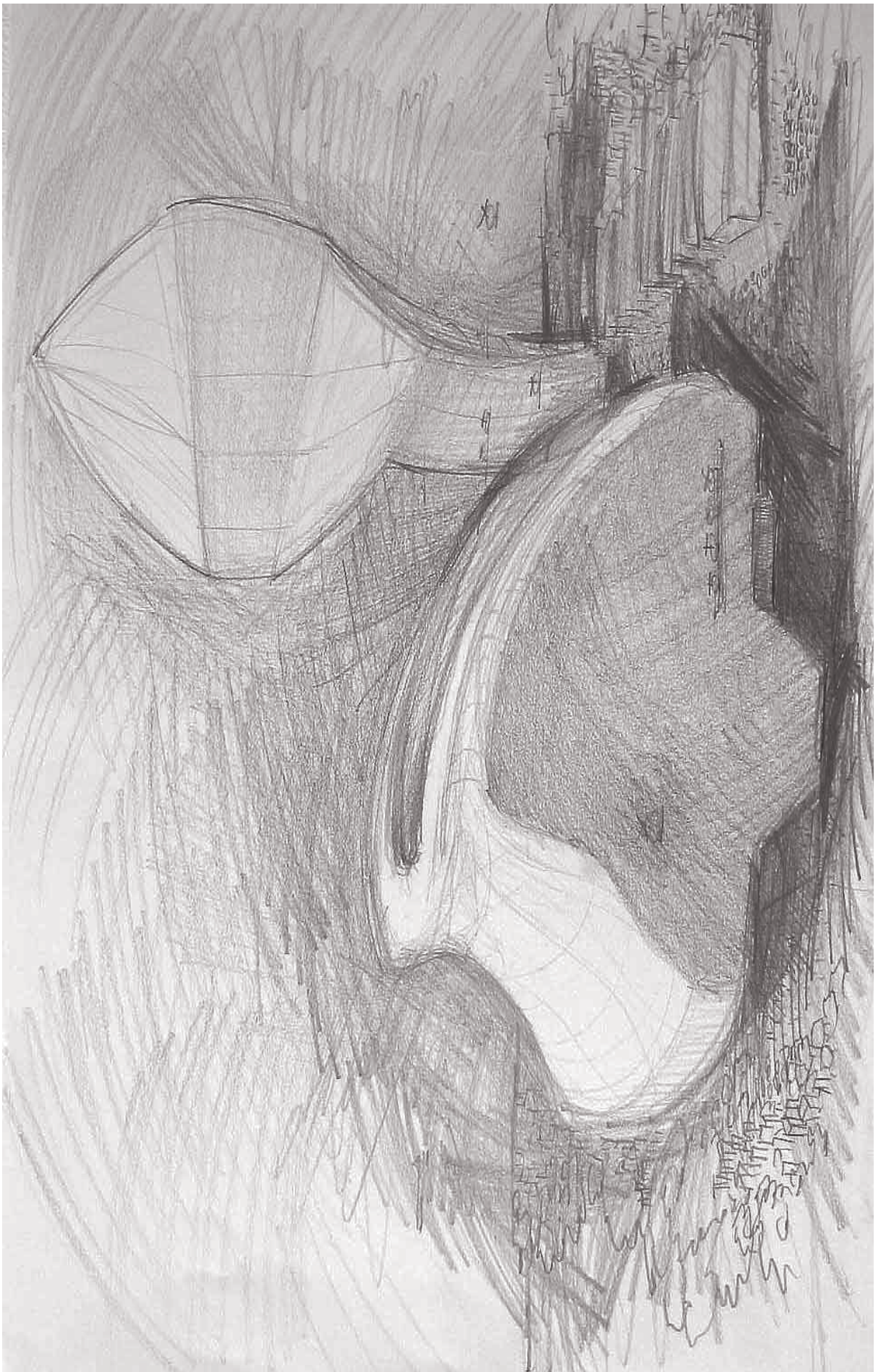
Der er 3 mindre kasseformede hule beholdere samt 2 skulpturelt formede meget større hule beholdere. De er indstøbt i samme hule fundament og belægning.

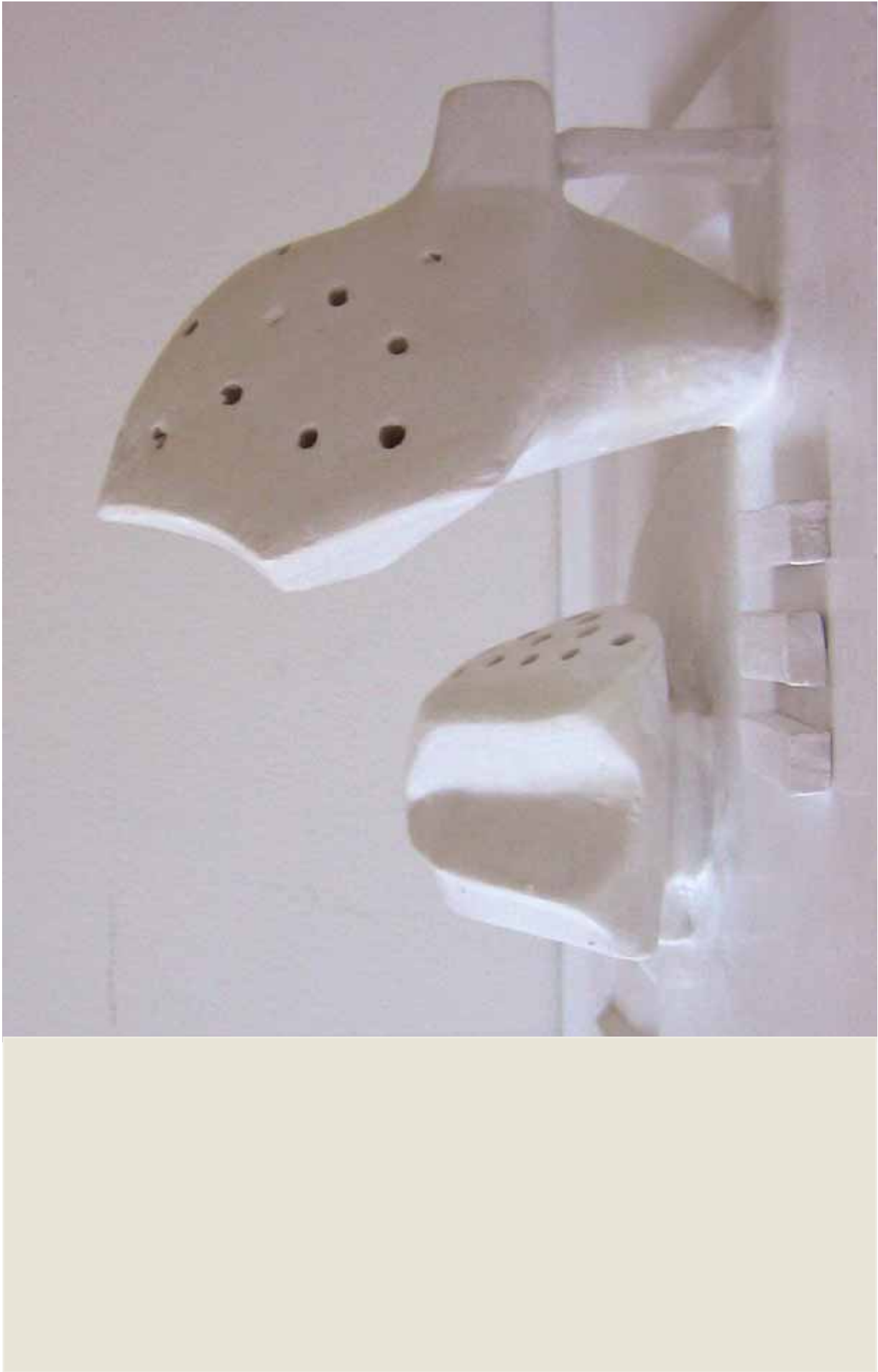
De skulpturelt formede bygningskroppe indeholder et kontrastfuldt formspil. Den amorf, runde og bløde form overgår lokalt og kontinuerligt til skarpe, retvinklede og kantede former.

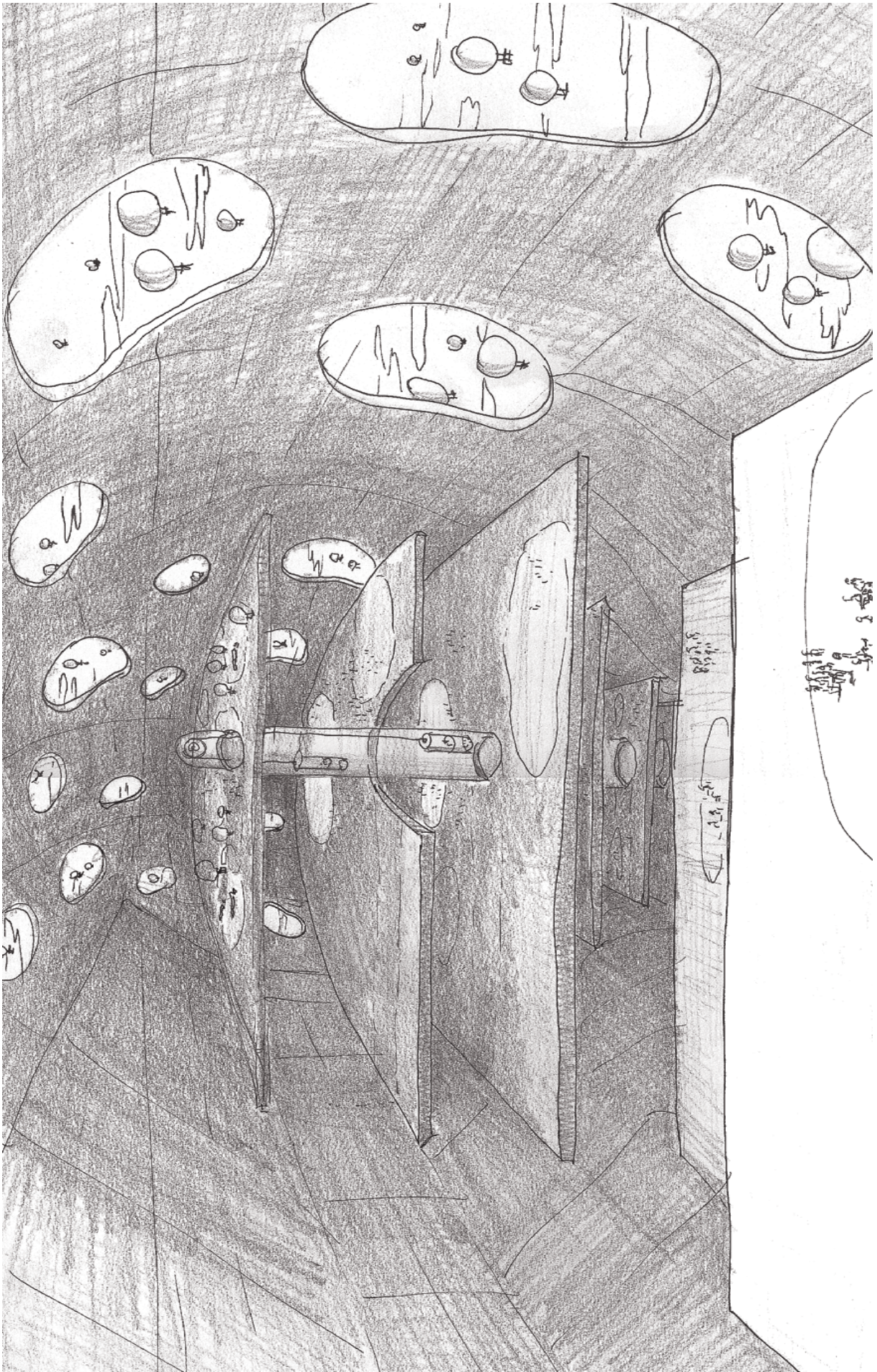
Fladerne i bygningskroppene er overvejende monotone, kontinuerlige og ubrudte, men lokalt perforerede, med cirkulære huller. Det bevirker at bygningskroppene fra nogle vinkler opleves som monolitiske, massive og tunge, mens de fra andre opleves som hule og lette beholdere opbygget af en tynd skal. Hele kompleksset fremstår som om det er støbt in-situ og ud i ét.









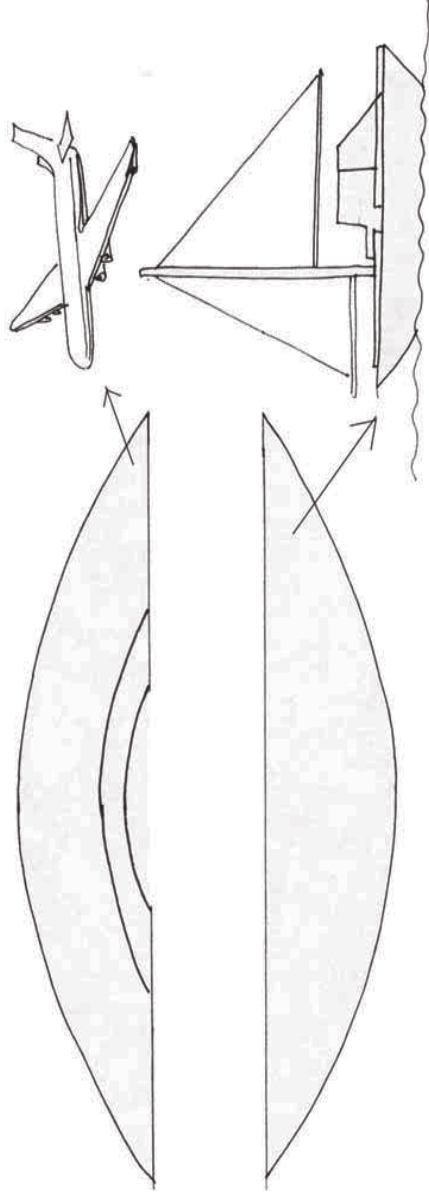
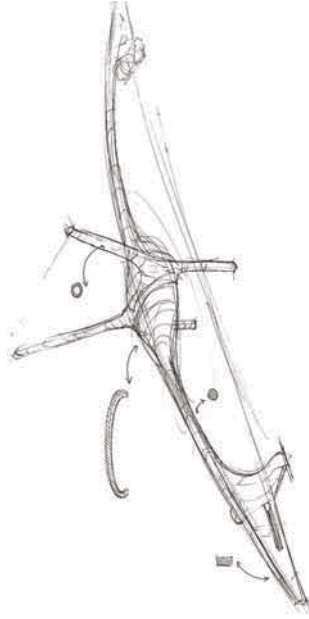




Model 2

Den ny betons form

Kæmpekonstruktion 2

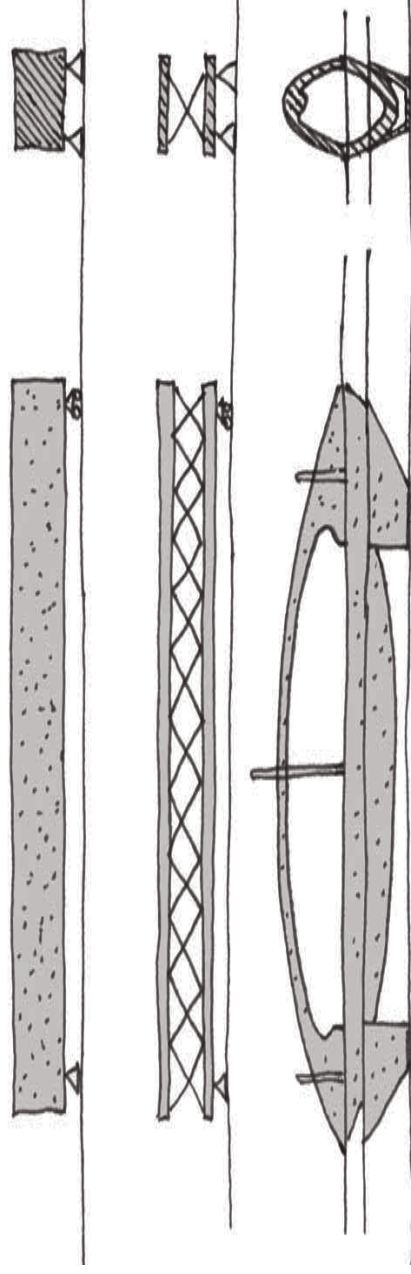


Model 2 består af én beholder, dækelementer og et overdække alt tænkt udført i ny beton.

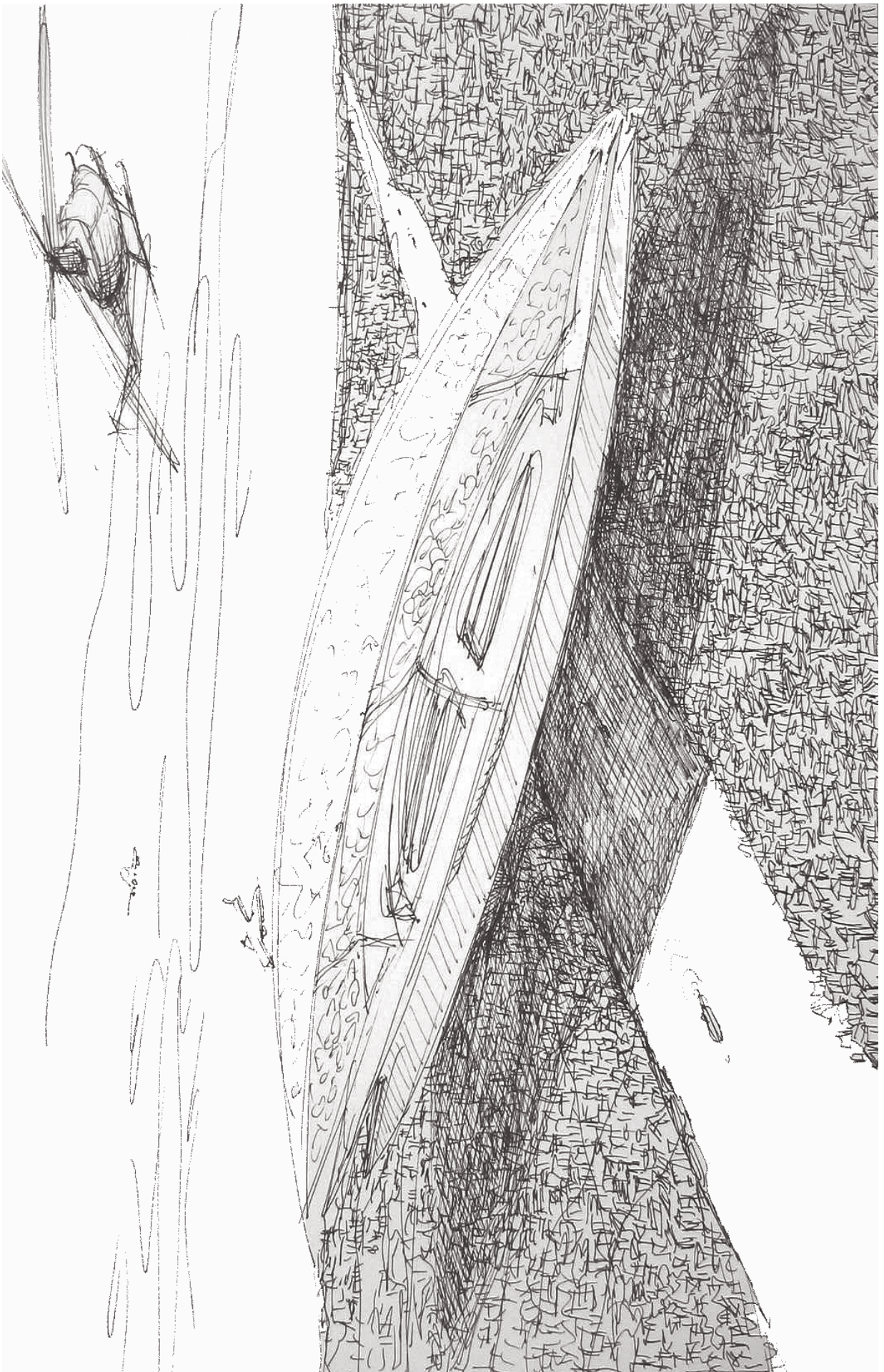
Beholderen er udformet som en bjælke, der er understøttet af ben og som bærer et overdække. Den består af en konveks, hul bådformet underflange, samt skulpturelt formede profiler som overflange.

Underflangen er støbt som én sammenhængende flade, mens overflangen består af forskelligt udformede profiler, der forløber uden synlige overgange fra det rektangulære massive tværsnit, til det cirkulære massive, til den dobbeltkrumme massive flade, der lokalt overgår til hule profiler. Det vingeformede overdække er perforeret med vidt forskelligt udformede kantede huller.

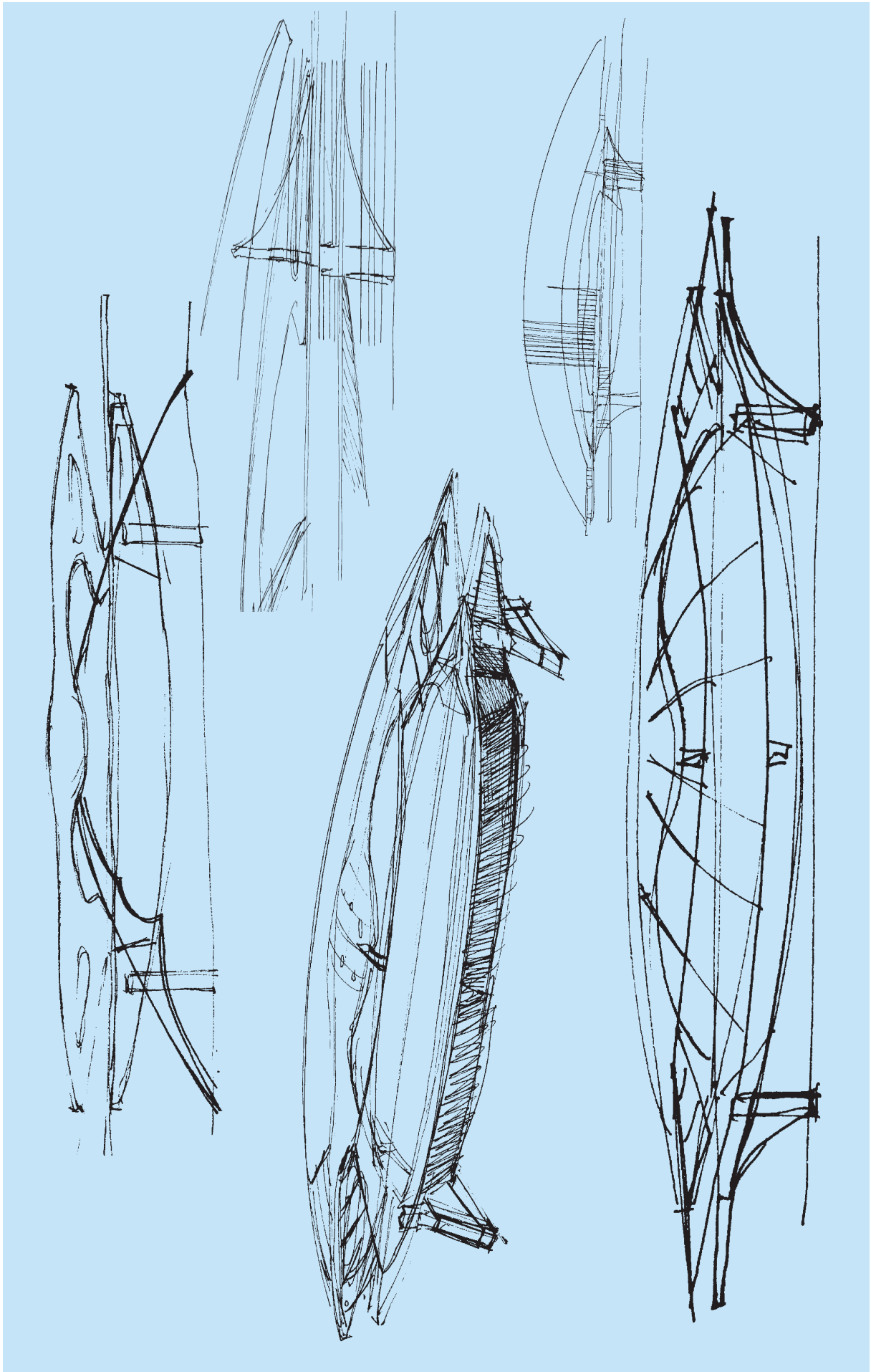
Graden af perforering er så stor at den perforerede flade kan opleves som sammensat af forskelligt udformede profiler med ikke synlige samlinger. De plane flader, dækelementerne, er lokalt åbne så adgang til underflangen er sikret. Konstruktionens ben er geometrisk kasseformede. De kan i princippet være placeret på vand, men også i vand.

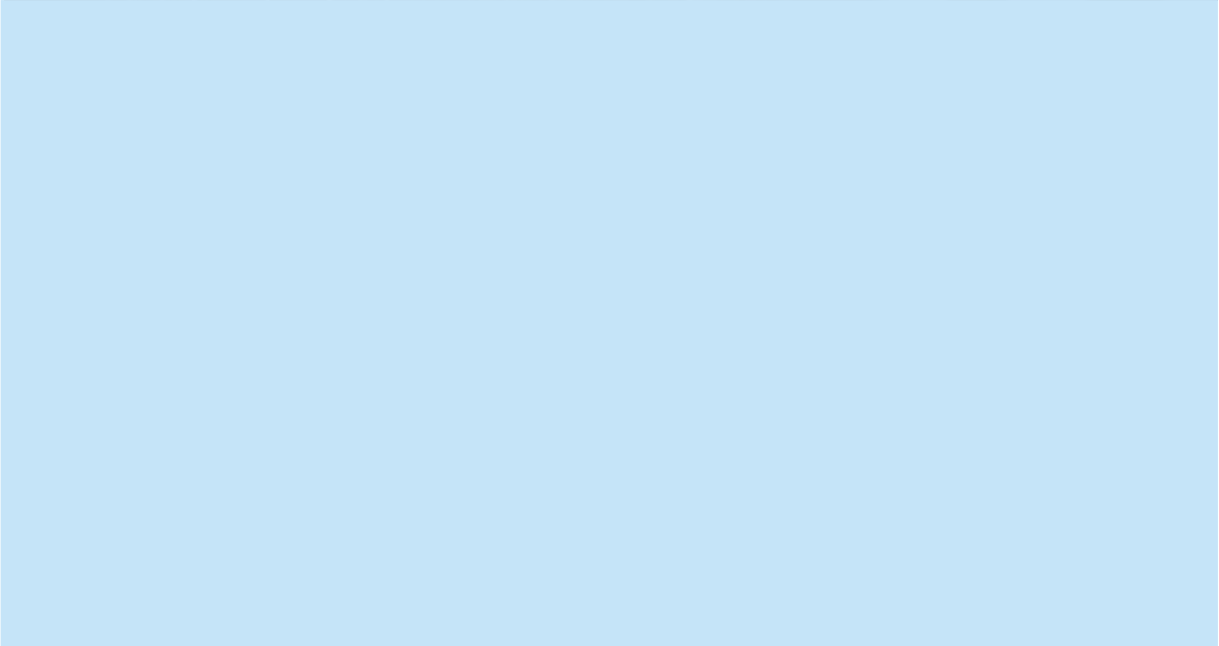


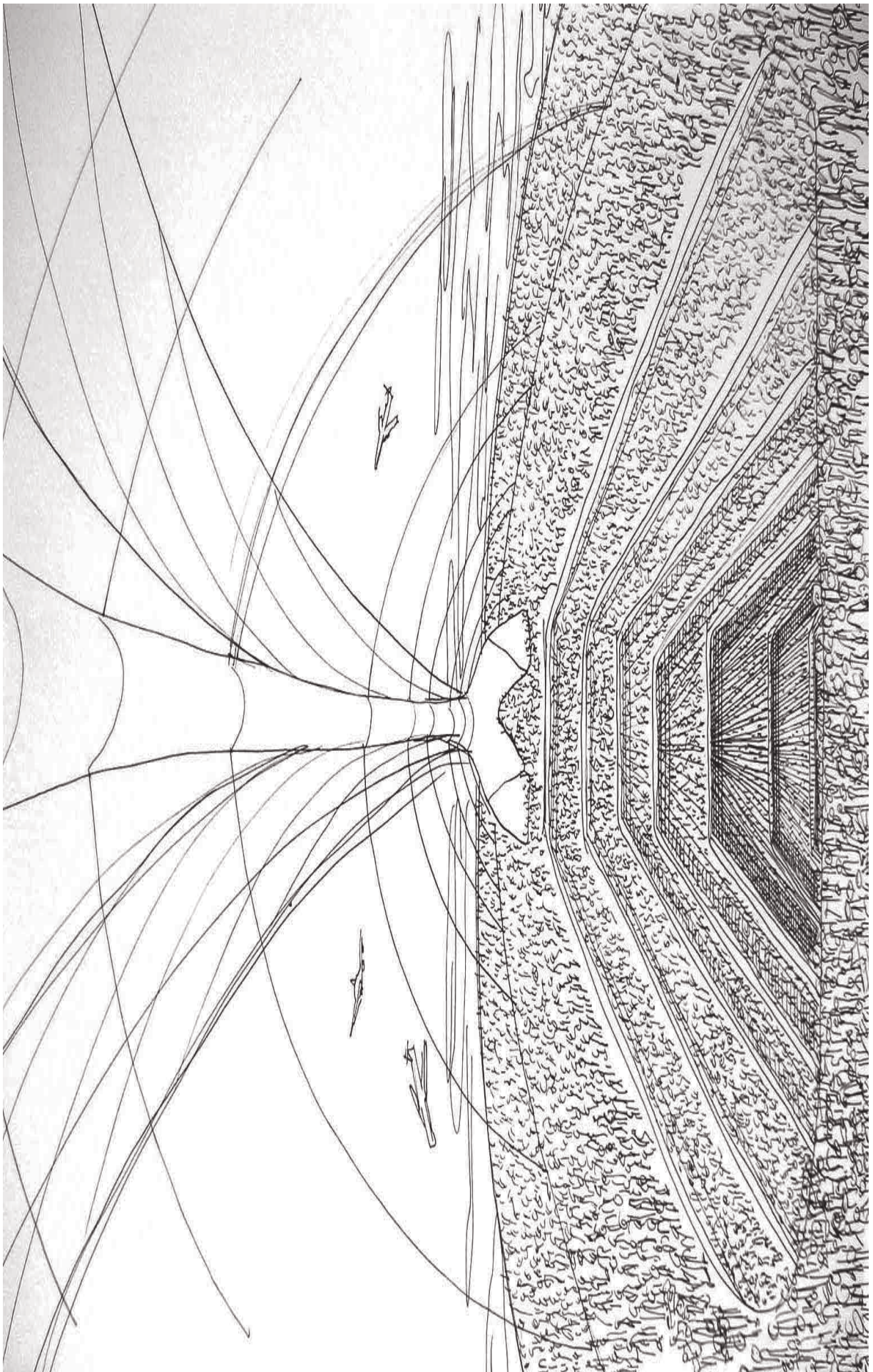












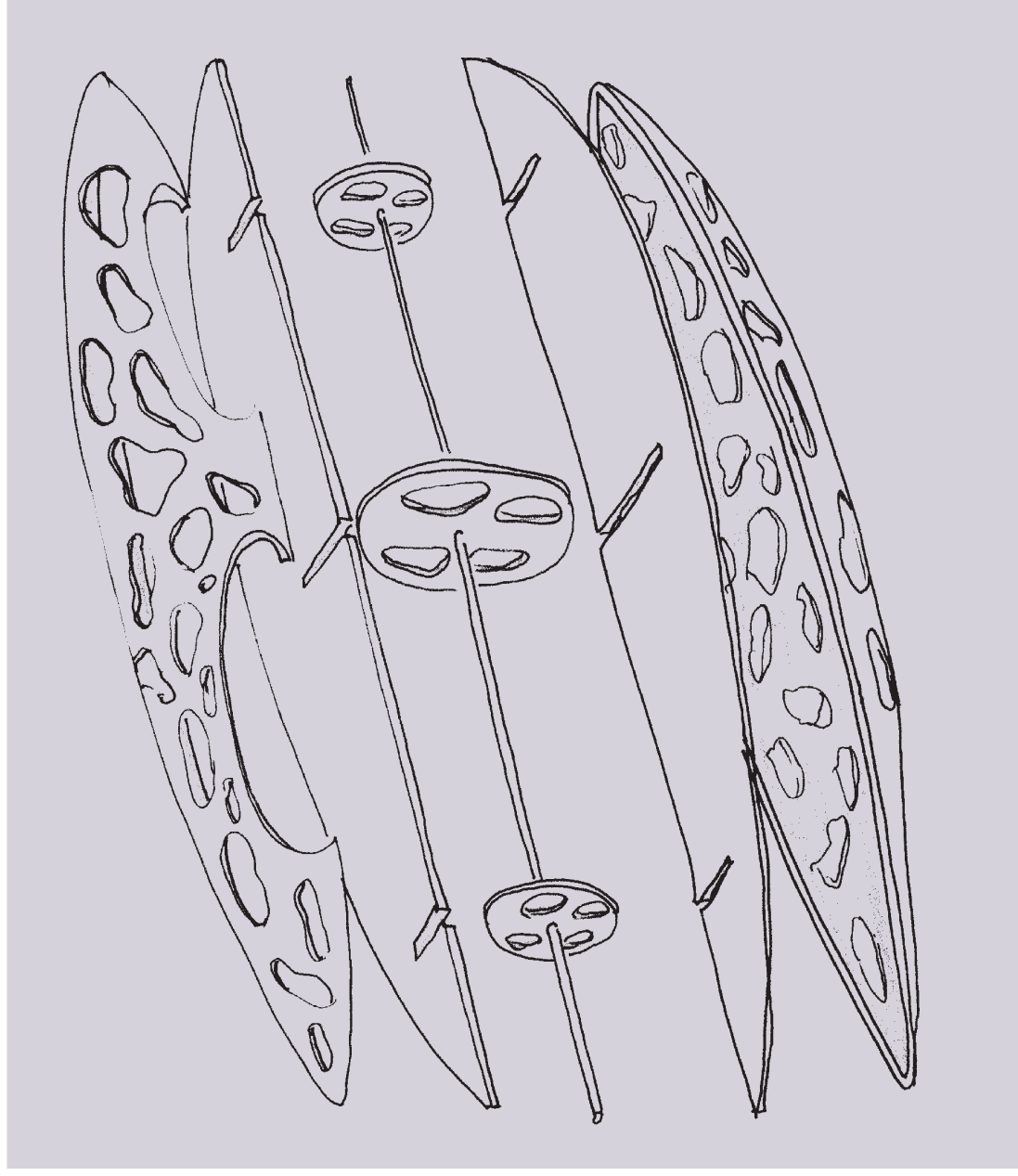
Model 3

Den ny betons form

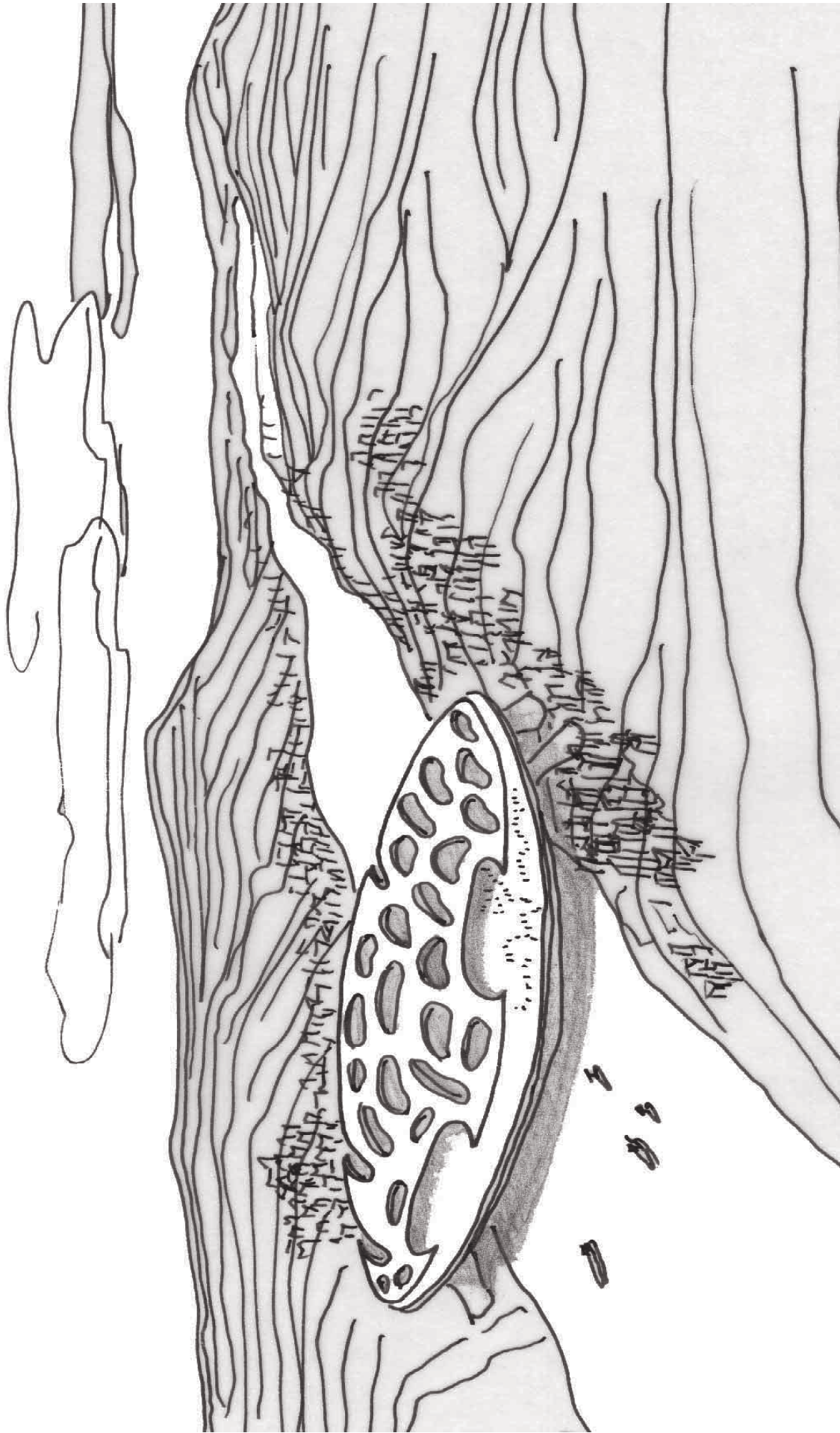
Kæmpekonstruktion 3

Model 3 består af en hul beholder som tænkes udført i ny beton.

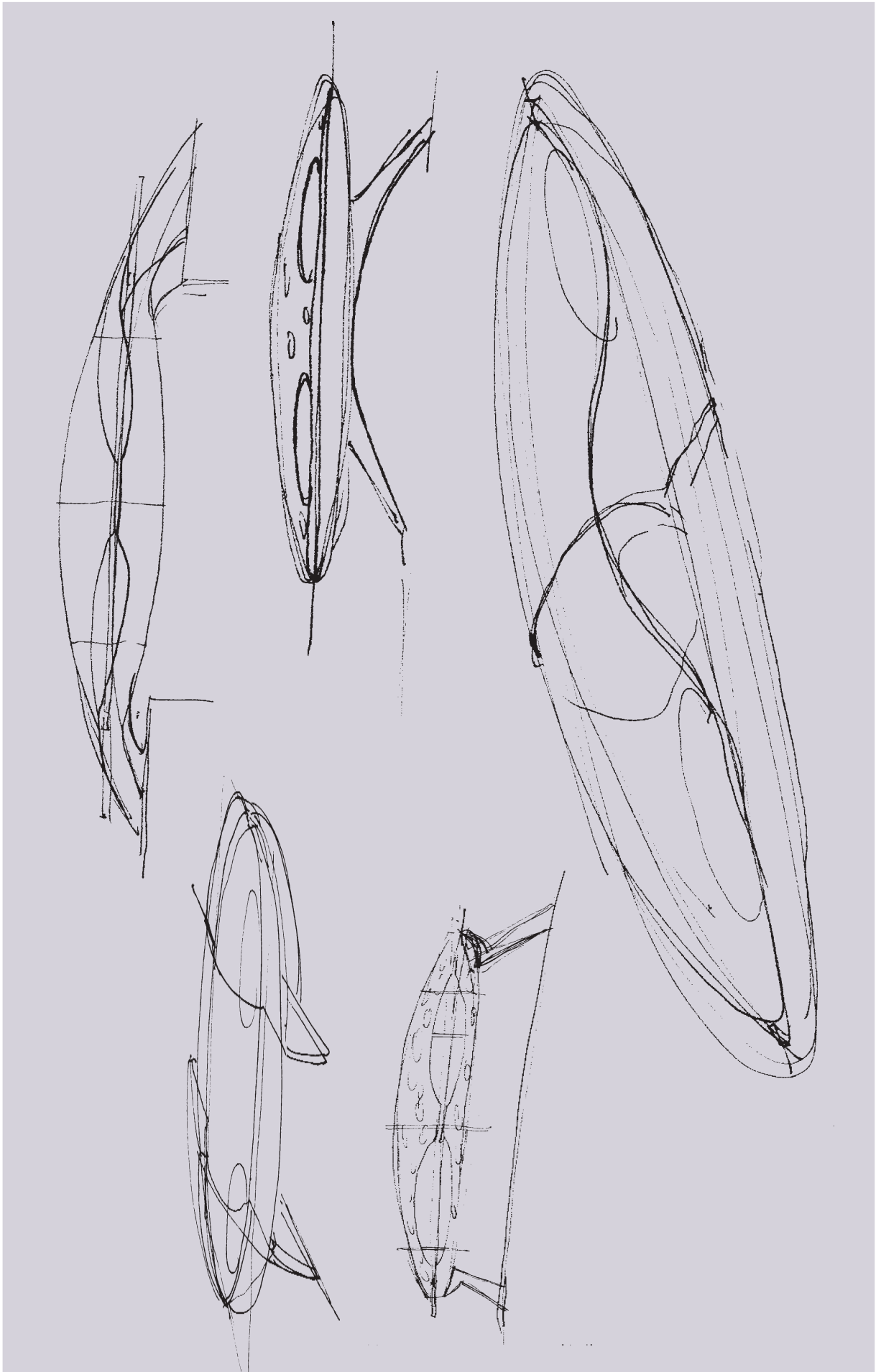
Beholderen er formet som en bjælke med dobbeltkrumme tynde flader som flanger. Bjælken har et centralt plant fladeelement og tværgående cirkulære afstivere. Den er understøttet af 4 hule cylinderlignende ben med varierende tværsnit. Bjælakens perifere flade, samt benene er brudt af forskelligt udformede huller som tillader aflæsning af skal og godstykkelse, samt lader lys/skygge dynamikken få en afgørende rolle for konstruktionens fremtoning. Konstruktionen er støbt ud i ét eller samlet af elementer med ikke synlige samlinger. Den kan være placeret på land, men også i vand.



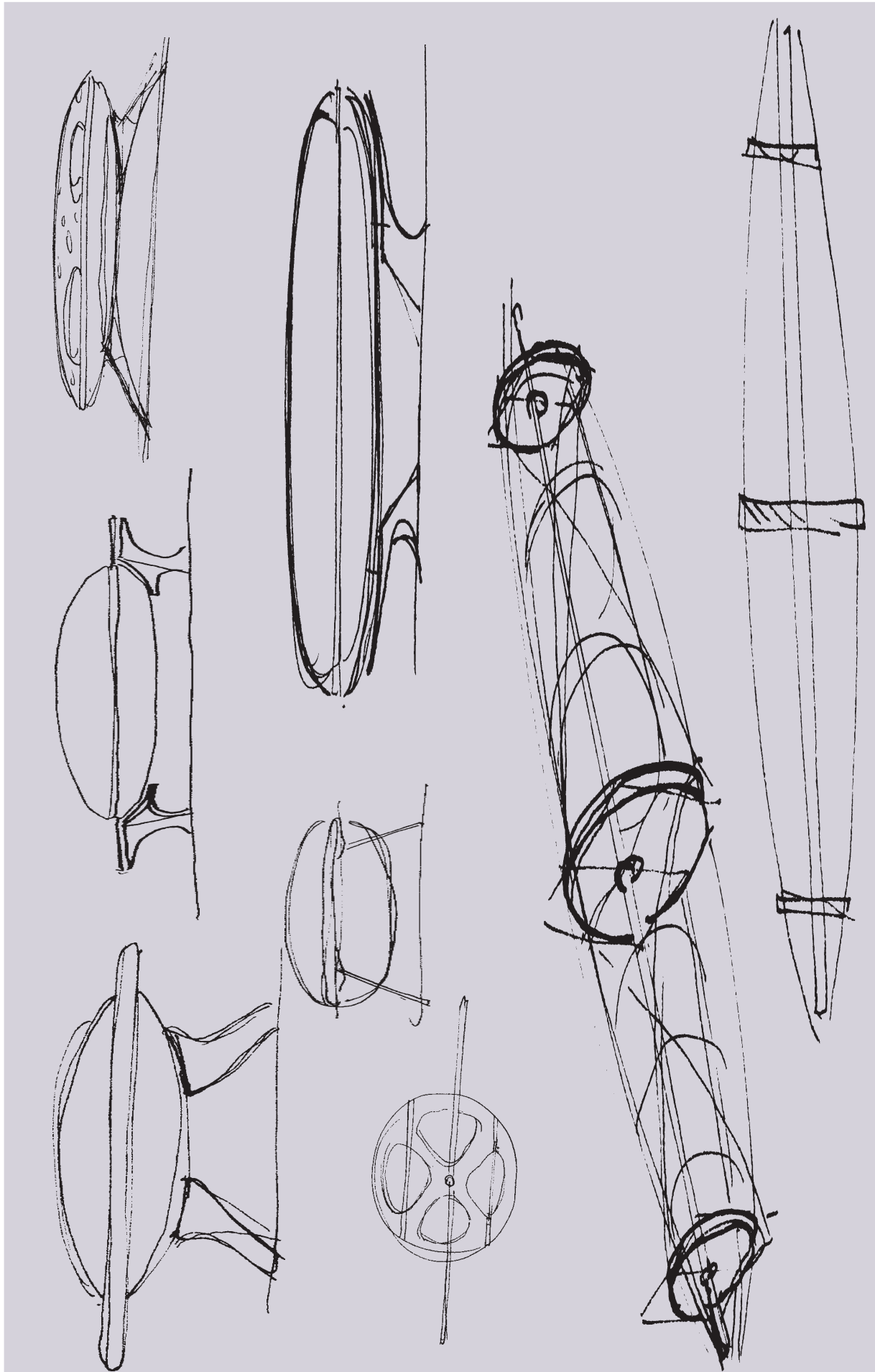


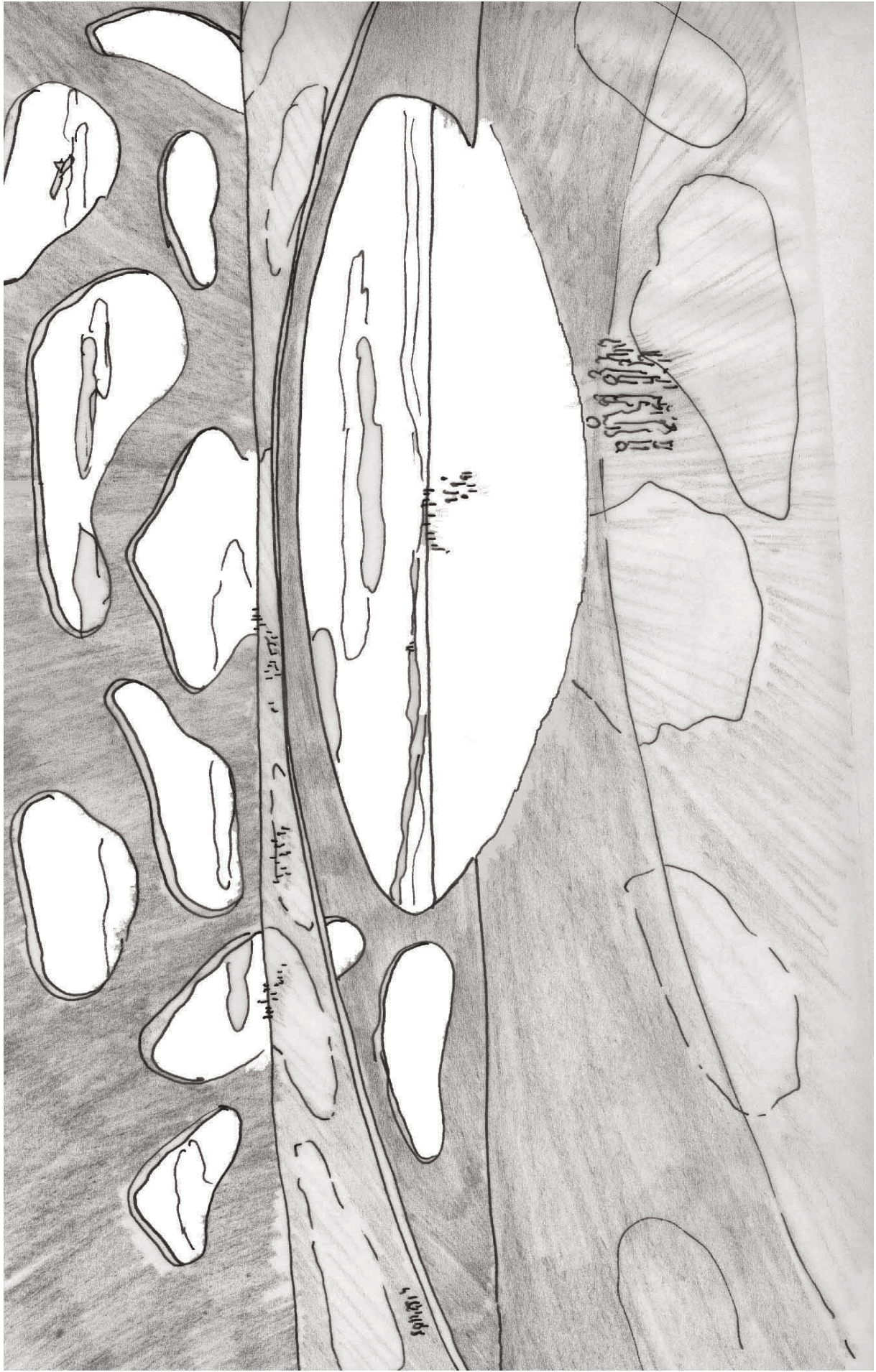












Model 4

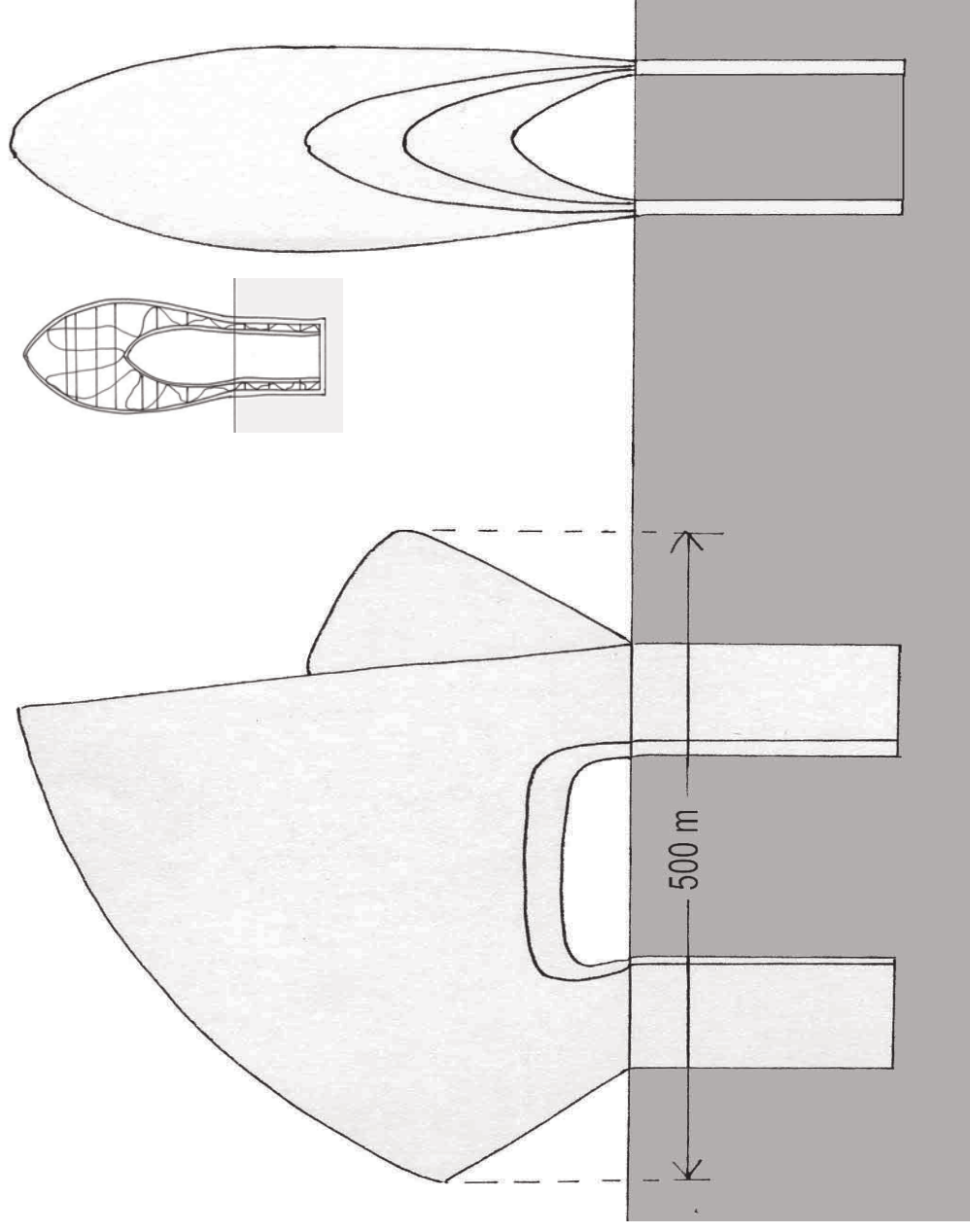
Den ny betons form

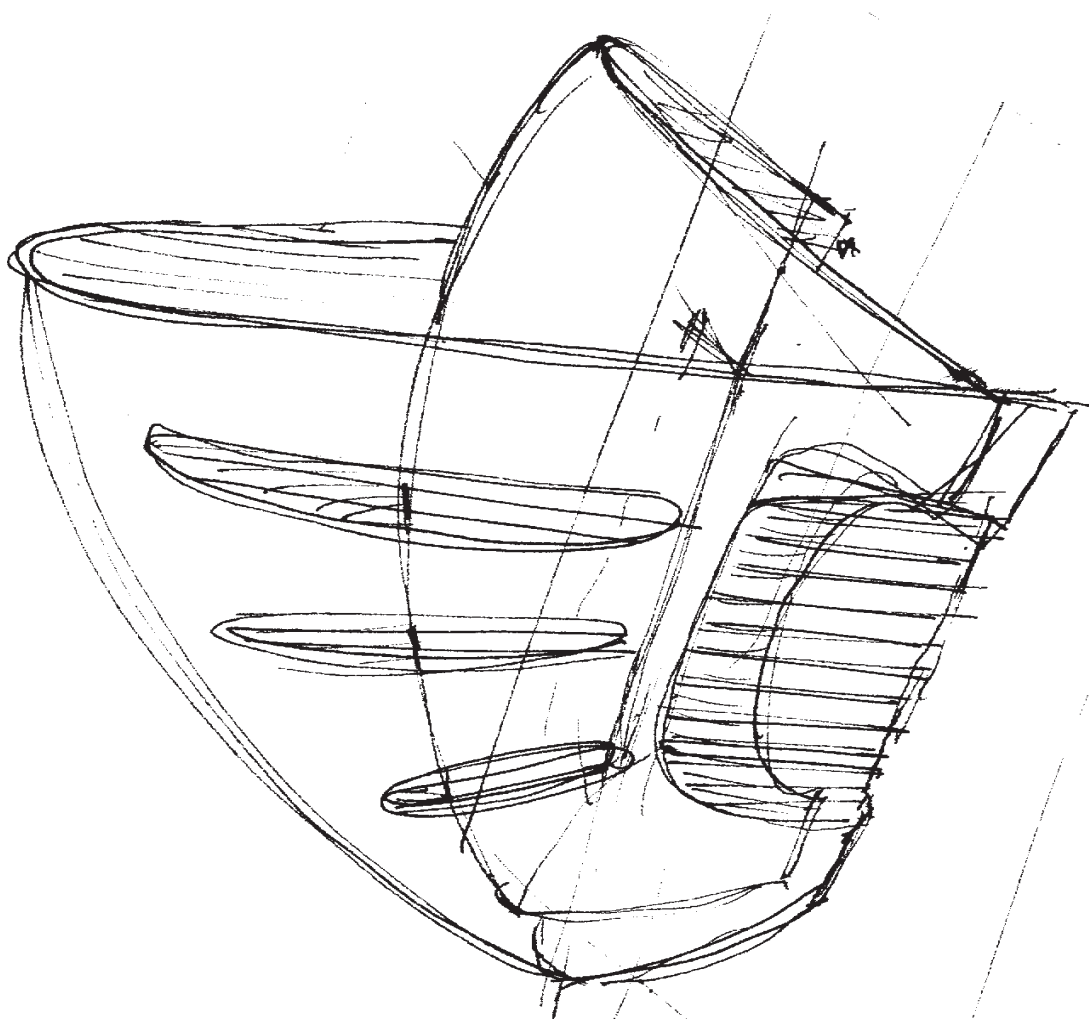
Kæmpekonstruktion 4

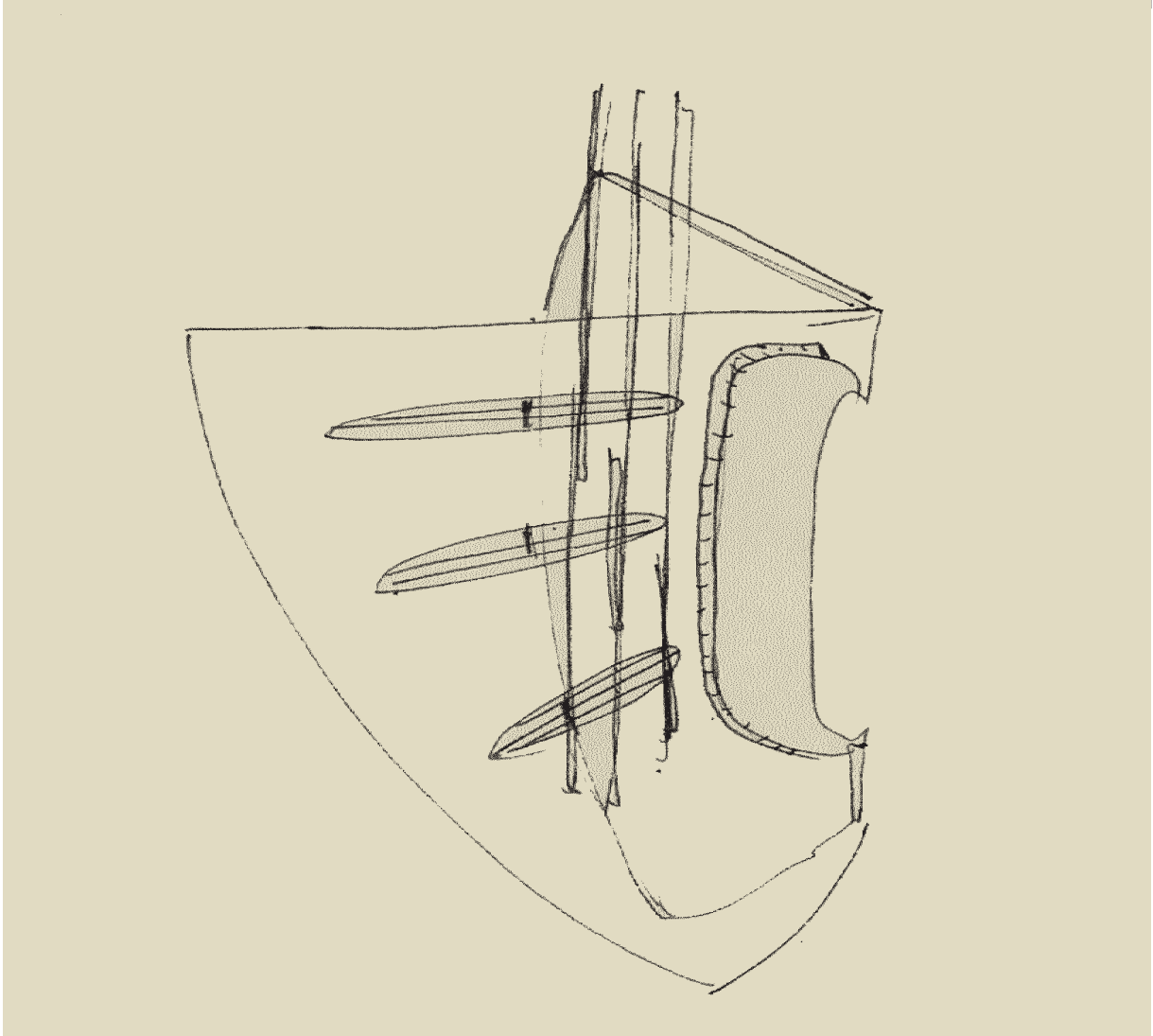
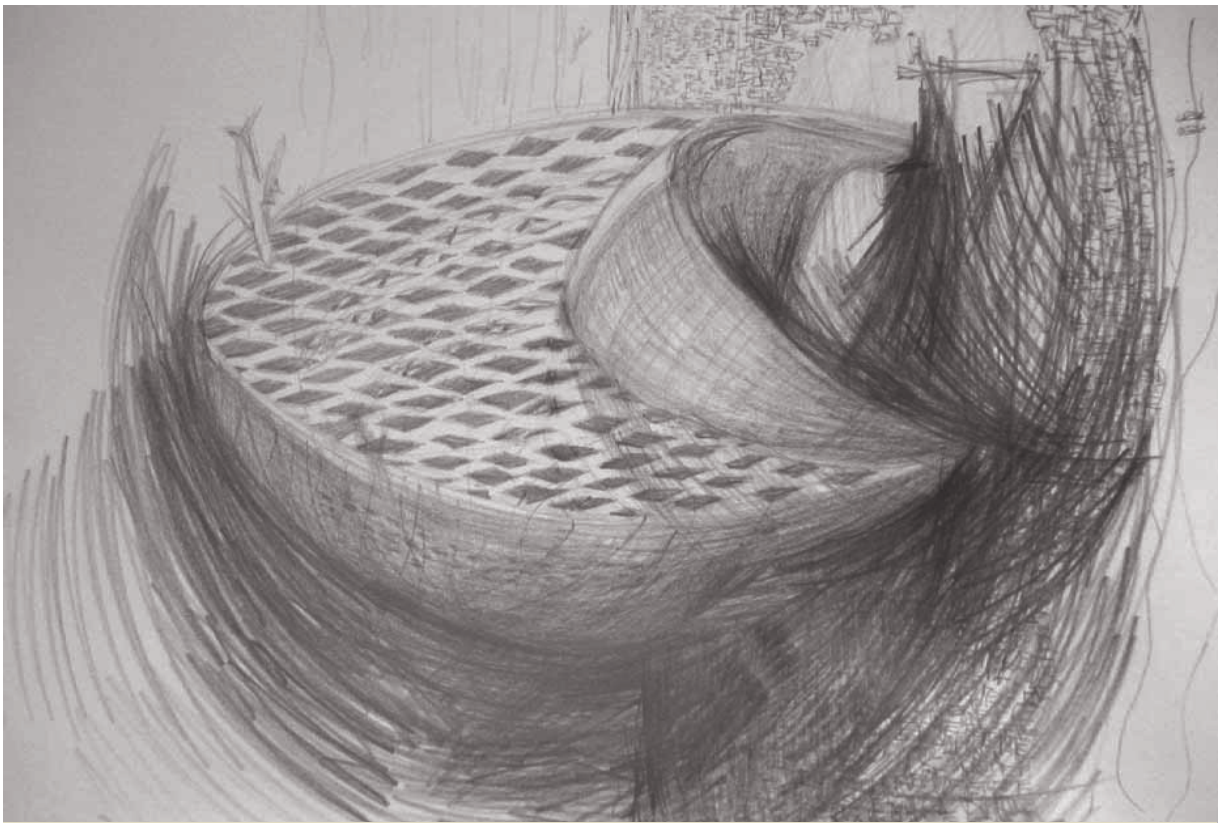
Model 4 består af to hule beholdere, den ene uden på den anden. De udspringer af samme fundament og belægning. Beholdere, fundament og belægning tænkes udført i ny beton.

De to beholdere er indbyrdes forbundet dels ved det nævnte fundament og belægning, men også ved tværgående dækelementer.

Beholderne er opbygget som store krumme og konvekse flader, der i fundamentet overgår til retvinklede kasseformer med plane flader. Fladerne er monotone, sammenhængende og kontinuerle, men overgår lokalt til områder opbygget af diskrete profiler, som tillader lys at passere. Bygningskroppenes godstykkelse varierer så de er størst ved baserne og aftagende opad. De er dels støbt ud i ét, men lokalt sammensat af præfabrikerede elementer, dog uden synlige samlinger. Konstruktionen kan være placeret på land.



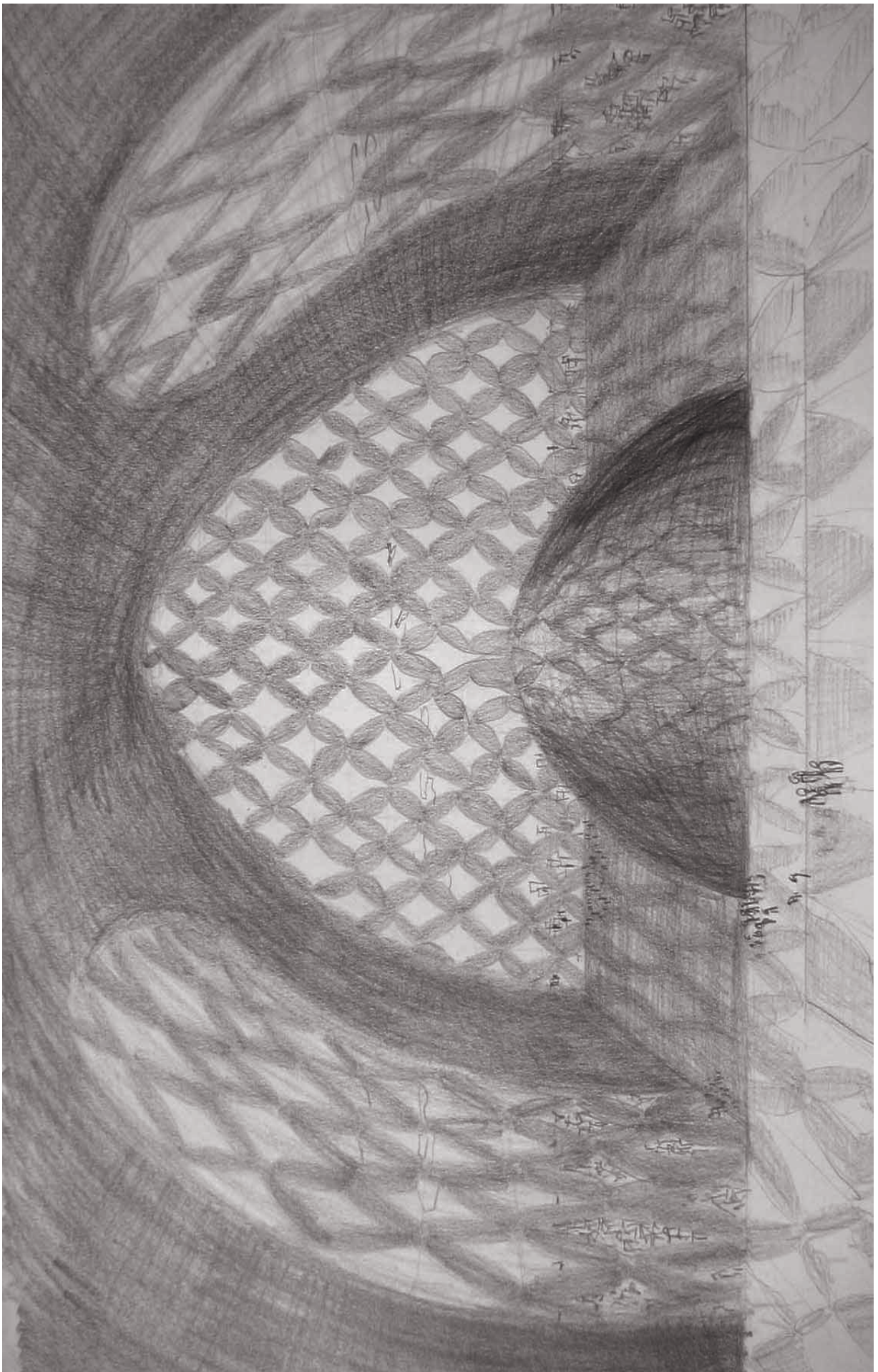








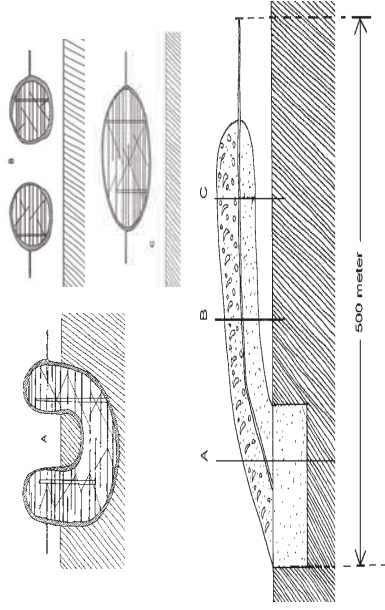




Model 5

Den ny betons form

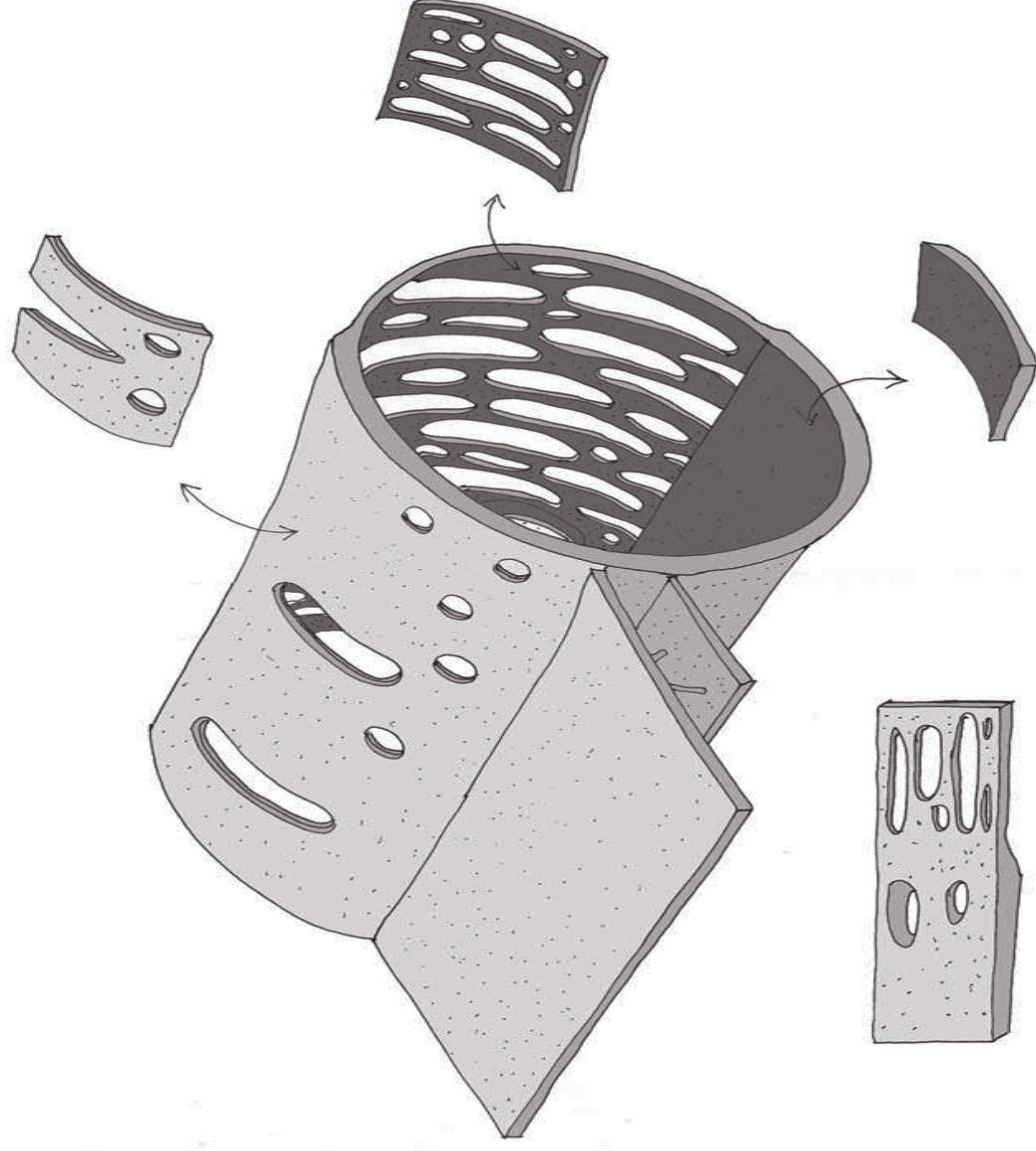
Kæmpekonstruktion 5



Model 5 består af en hul beholder. Den er formet som en torso, der efterfølgende er bøjet og hevet i. Beholderen er indstøbt i fundament og en belegning, samt behæftet med et plant dækelement, som forløber fra base til beholders snude. Alt tænkes udført i ny beton. Beholderens vægge er opbygget af sammenhængende, udbrudte flader, områder med forskelligt udformede og spredte huller, samt områder med en meget stor grad af vidt forskelligt udformede huller. Der er ingen synlige overgange imellem de forskellige områder.

Kæmpekonstruktionen har varierende godstykkelse både i dens længderetning, men også i dens tværgående retning. I længderetningen er godstykkelse kraftigst ved basen og kontinuerligt aftagende opad- og udadtil, mens de i tværgående retning er størst ved de ikke perforerede flader og abrupt overgår til mindre godstykkelse i de perforerede flader.

Konstruktionen kan være støbt ud i ét, men også samlet med ikke synlige samlinger af præfabrikerede elementer. Den tænkes placeret på land.

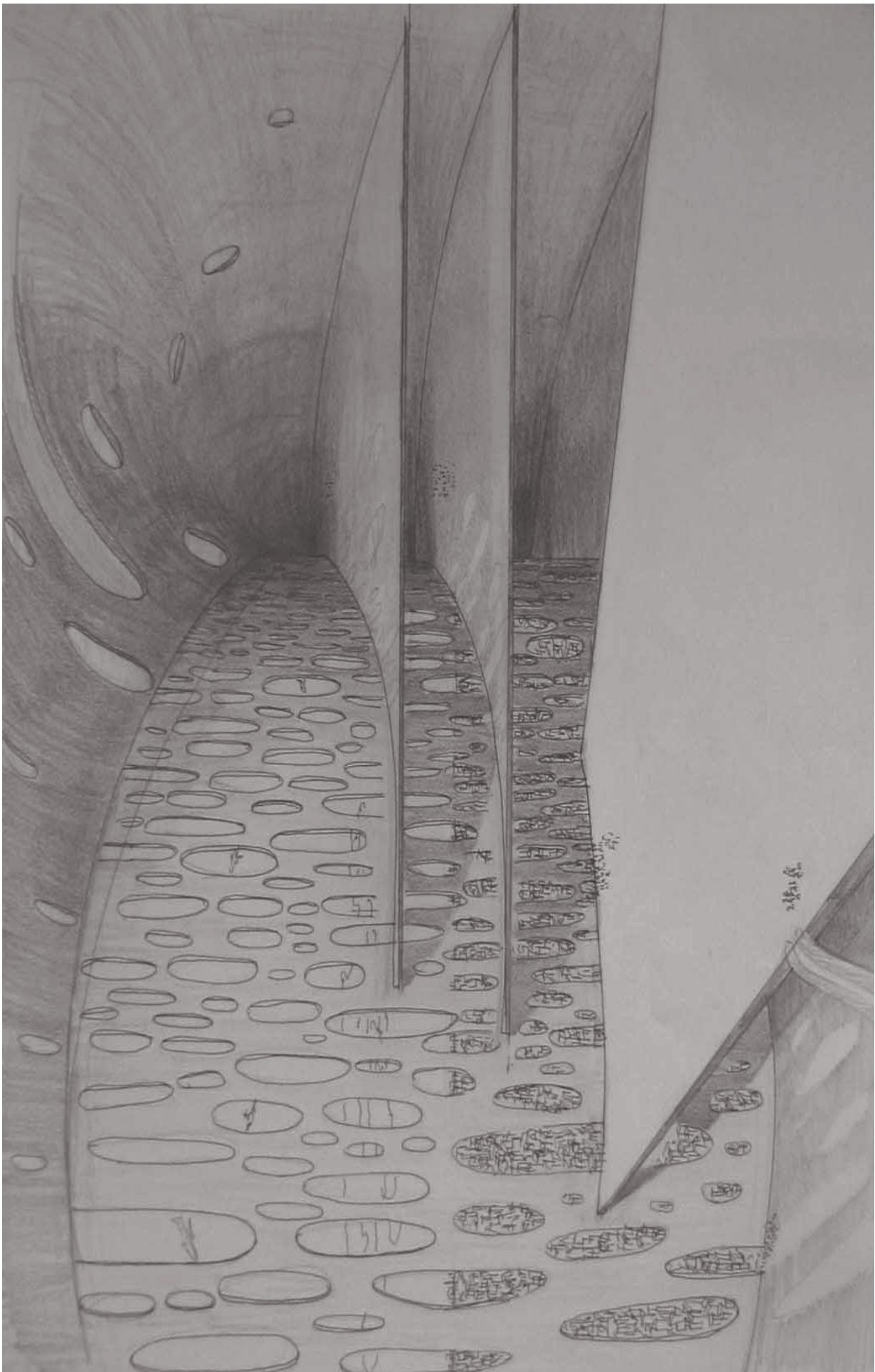








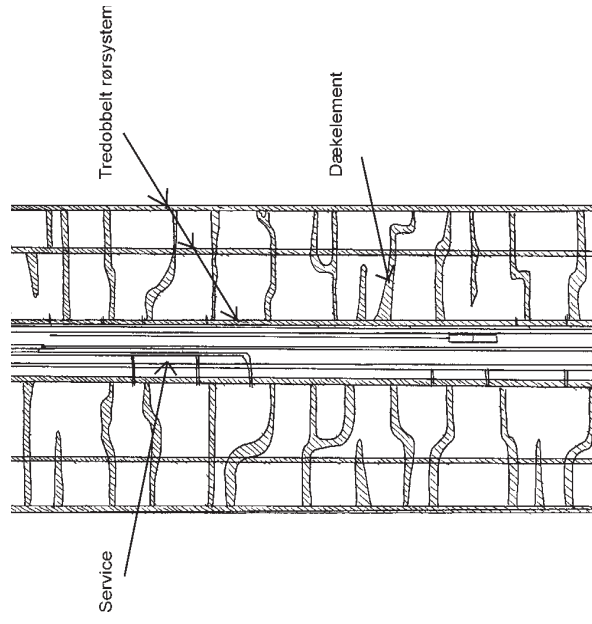




Model 6

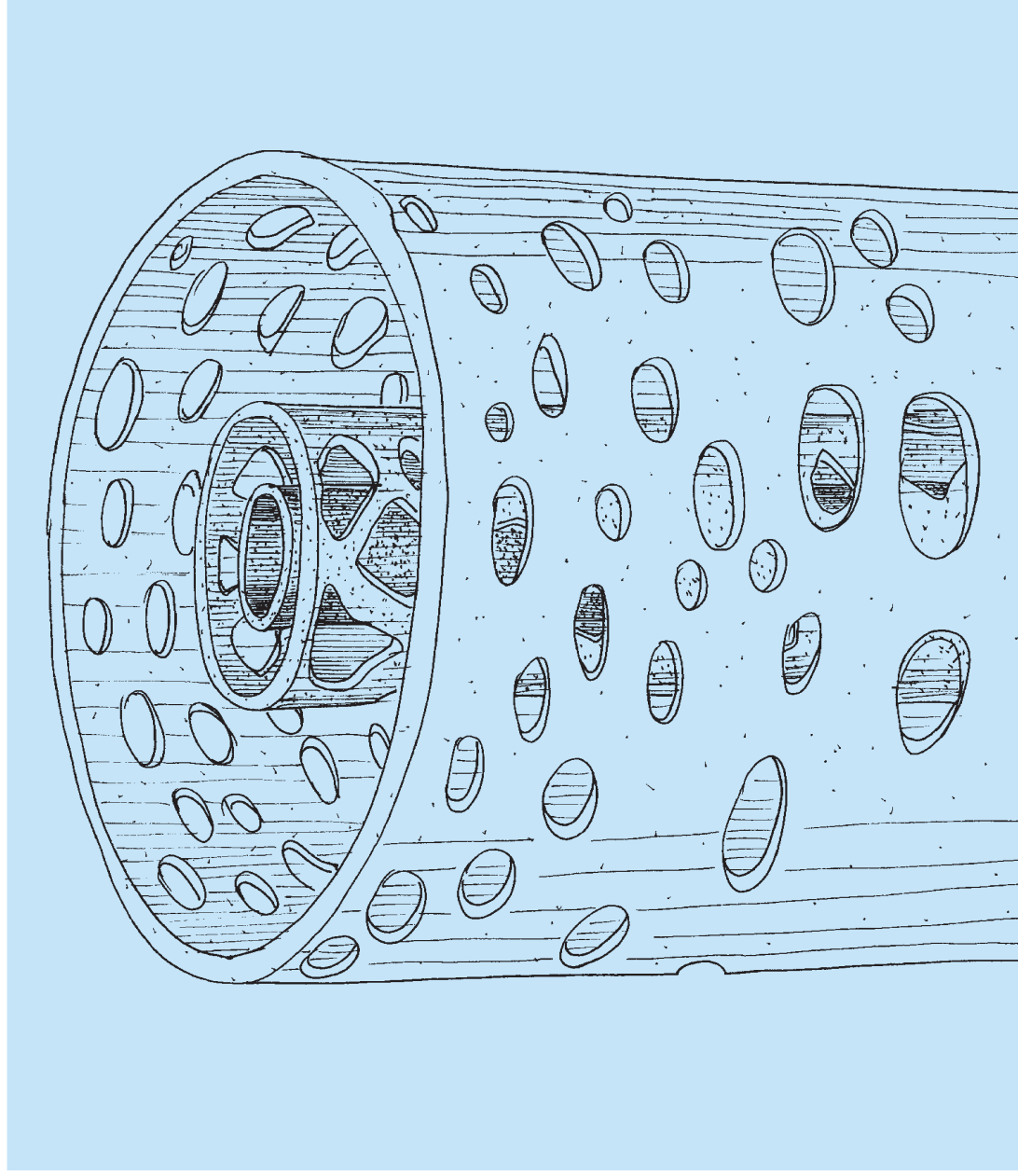
Den ny betons form

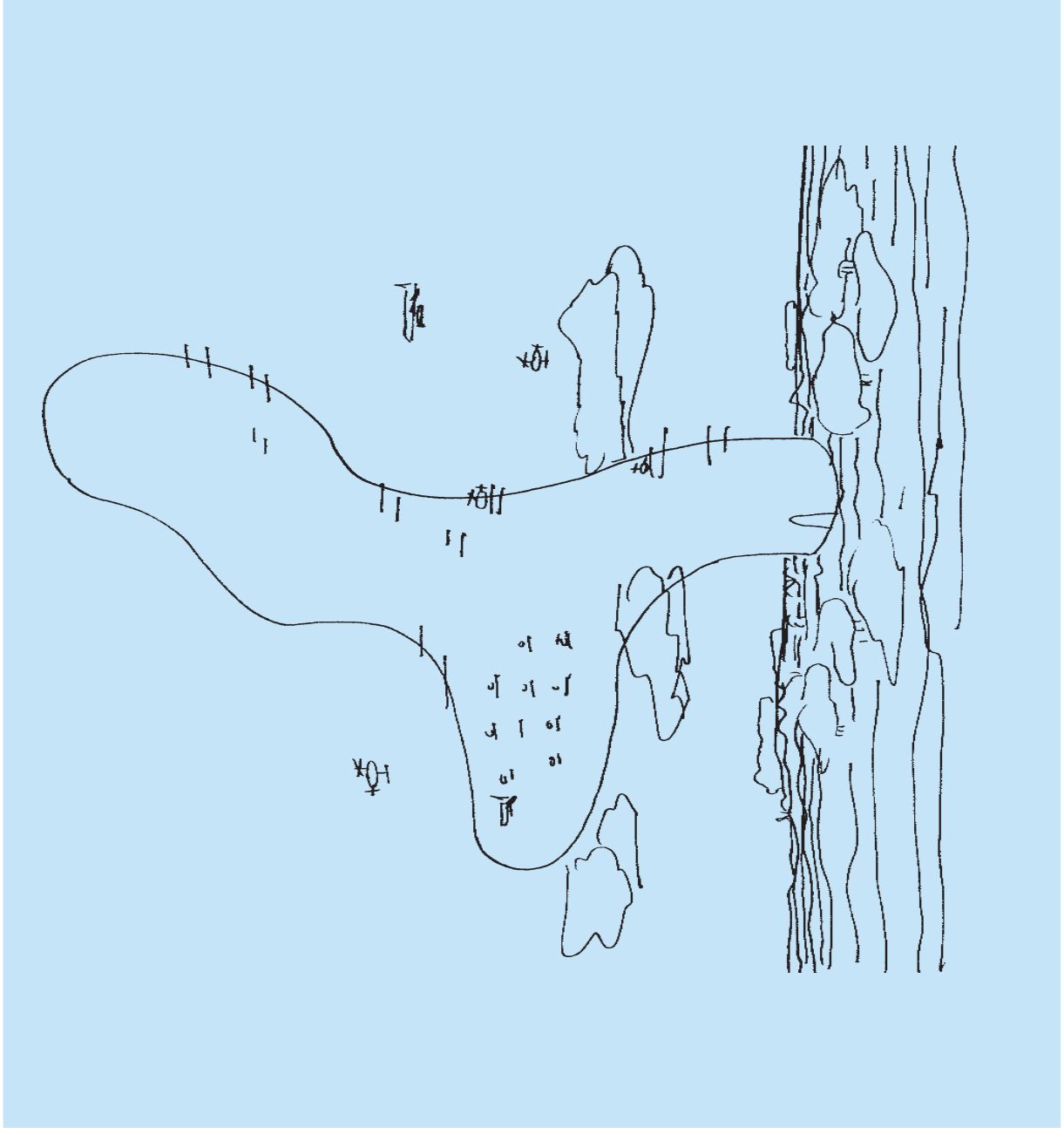
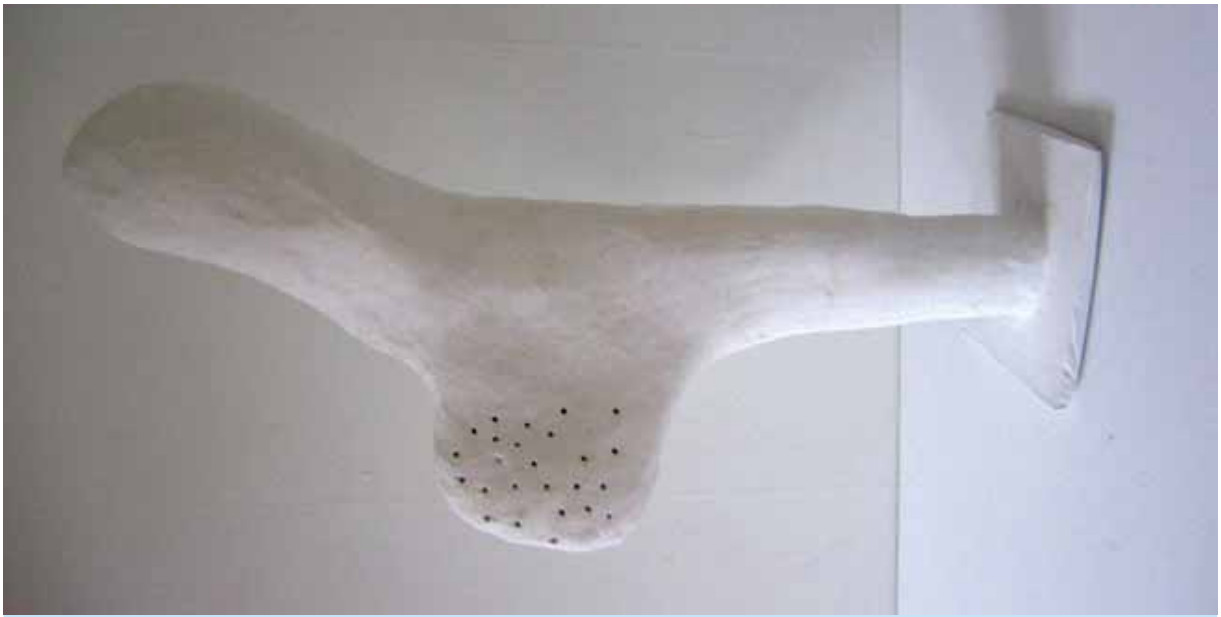
Kæmpekonstruktion 6

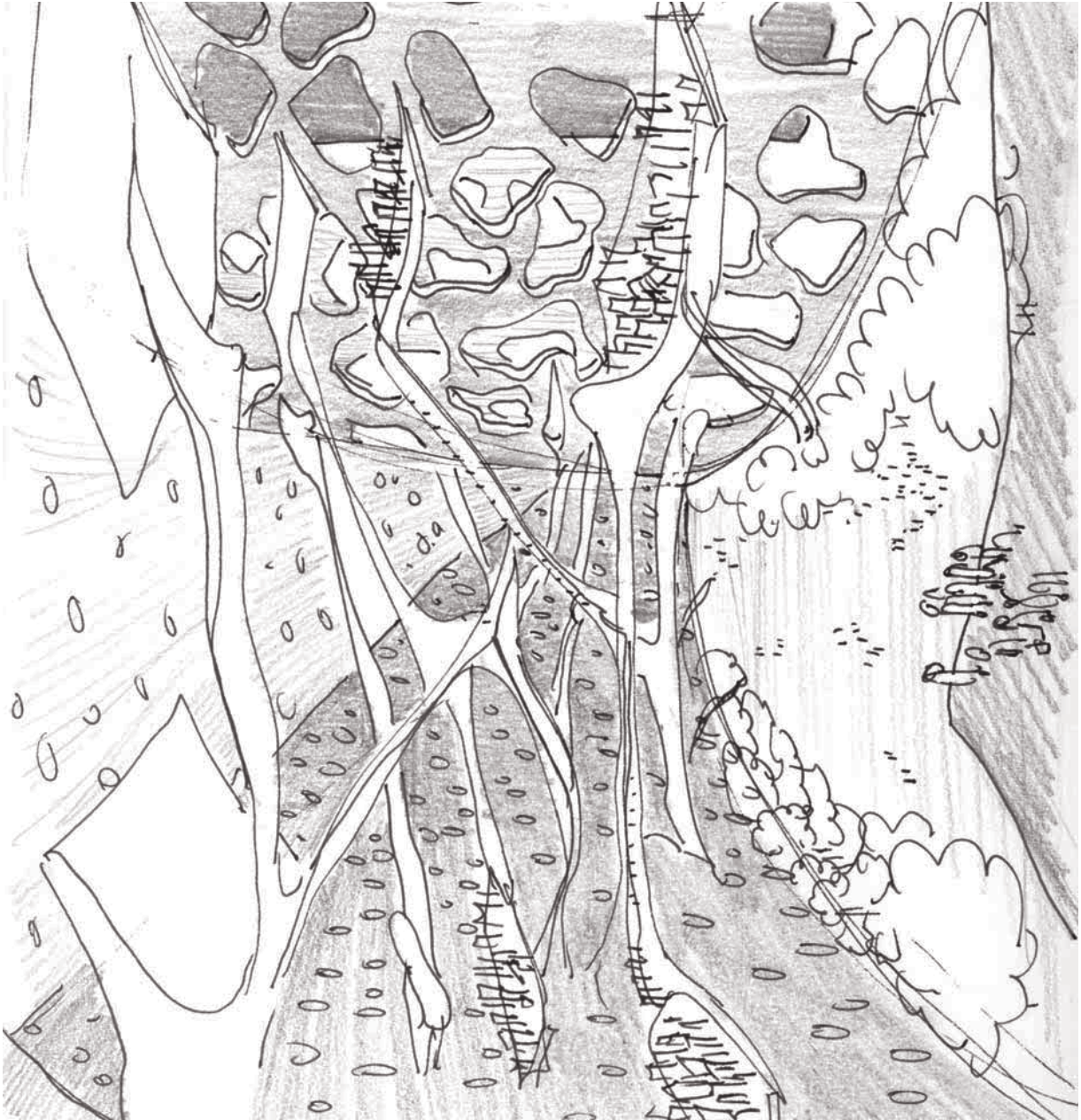


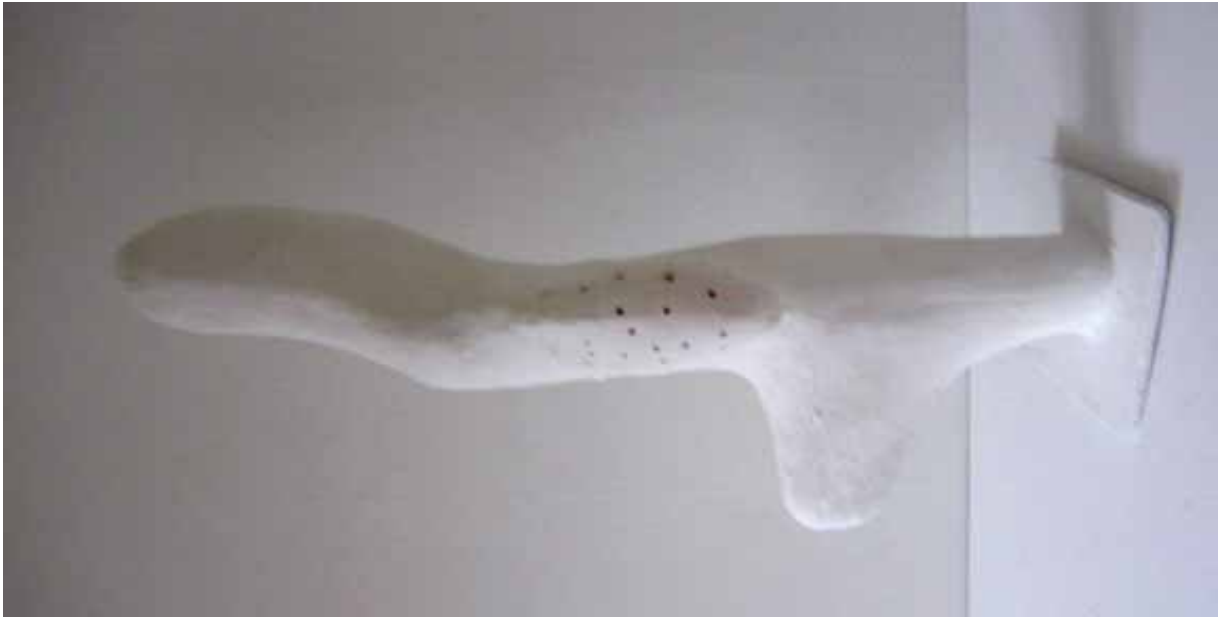
Model 6 består af 3 hule beholdere, den ene inden i den anden. De er alle indstøbt i samme hule fundament og belægning. Alt tænkes udført i ny beton.

Beholderne er indbyrdes forbundet, dels med fundament, men også med tværgående dækelementer. Beholderne er alle skulpturelt formede. De har forskellige grader af perforering, som gør at beholderne lokalt opleves som monolitiske og massive, men fra andre vinkler som hule og bestående af tynde skaller. Beholdernes godstykkelse er størst ved basen og aftager kontinuerligt opad. Beholderne kan i princippet være placeret på land, men også i vand.

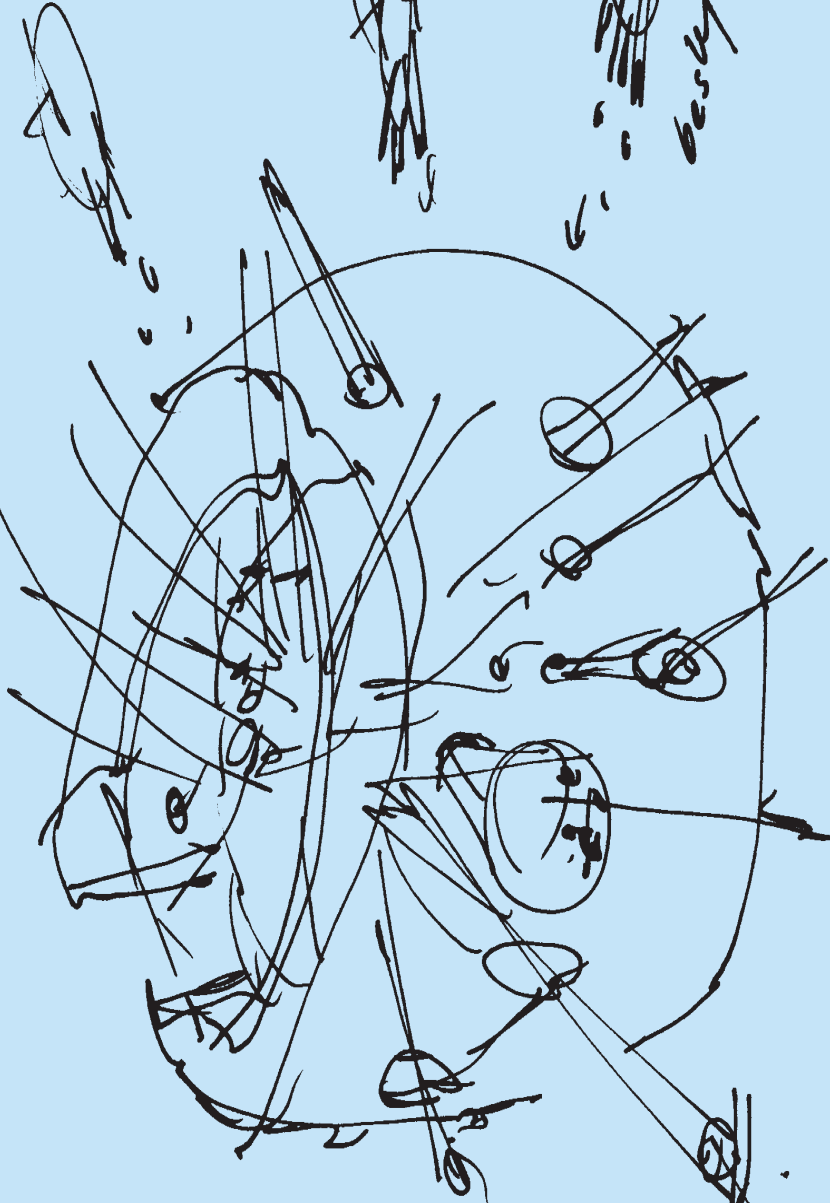








6-4-7 beskyddet



6/12 "elle"
mydrudd.s.j.t

Model 7

Den ny betons form

Kæmpekonstruktion 7

Model 7 består af to beholdere, som er indbyrdes forbundet med trækabler og en hul midtergang. Beholderne er indstøbt i fundamentet, samt én sammenhængende belægning. Alt tænktes udført i ny beton.

Den ene af de to beholdere består af dobbeltvægge, som er forbundet med tværgående dækelementer og afstivere. Den indbyrdes afstand imellem dobbeltvæggene er størst på beholderens midte i forhold til dennes længderetning, mens de mødes i beholderens yderste punkter. Beholderen er dobbeltkrum og fremstår som en skalkonstruktion. Den har et cirkulært tværsnit.

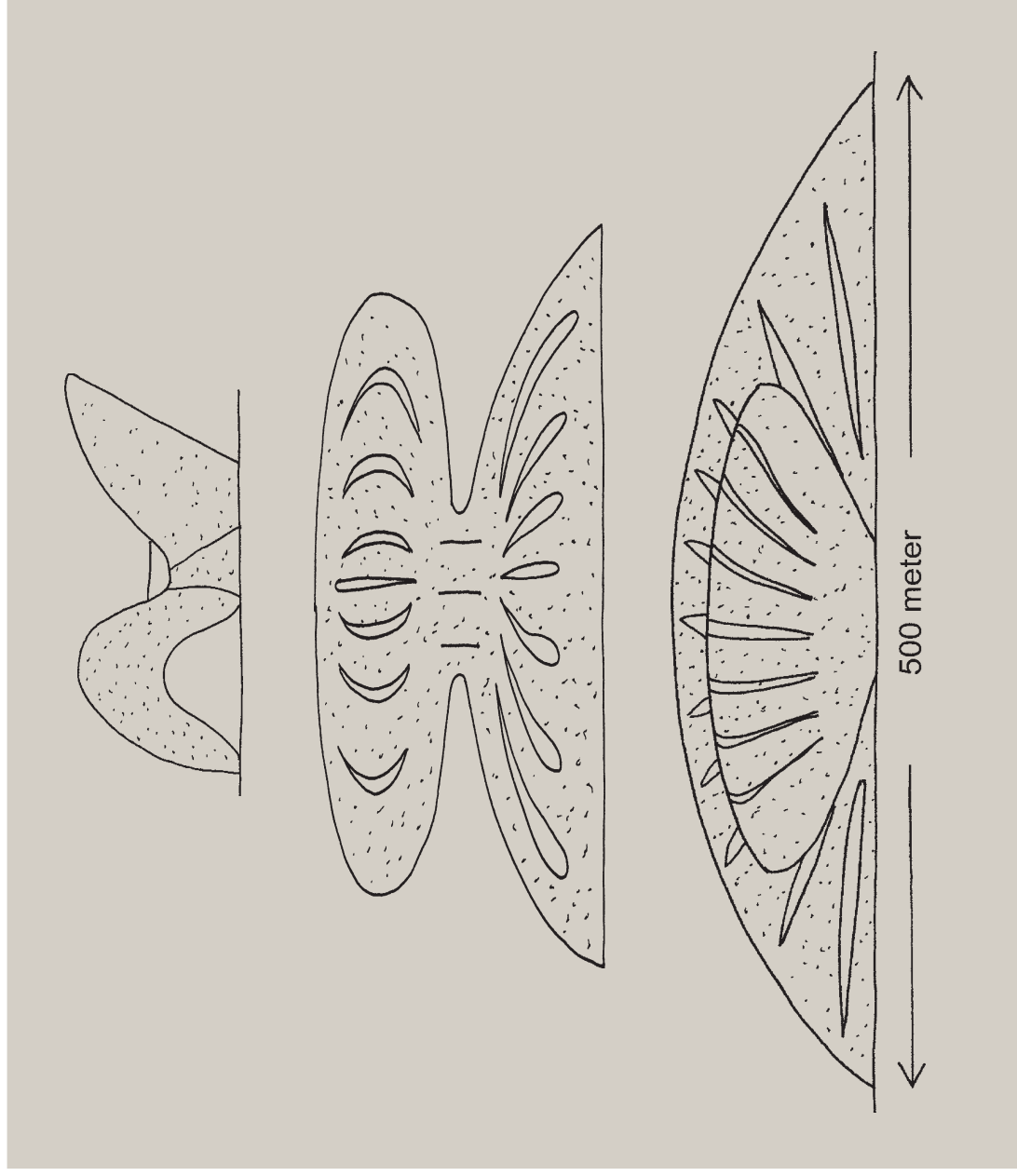
Den anden beholder ser ud som en skalkonstruktion, den er dobbeltkrum, men overgår lokalt i det plane pladedesign. Den er åben og enkeltvægget.

Beholdernes godstykkelse varierer kontinuert i takt med belastningsbilledet. De er størst ved baserne og aftagende opad.

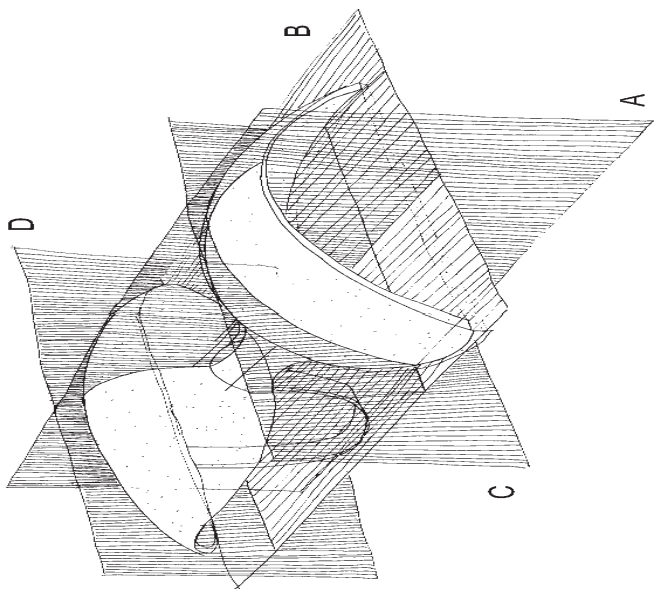
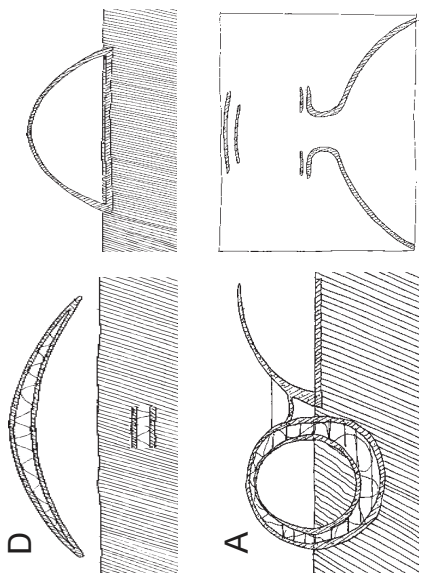
Begge beholdere består af flader som er brudte med et varieret mønster af huller for gennemtrængning af lys. Hele komplekset ser ud som om det er støbt ud i ét, hvad det også kan være.

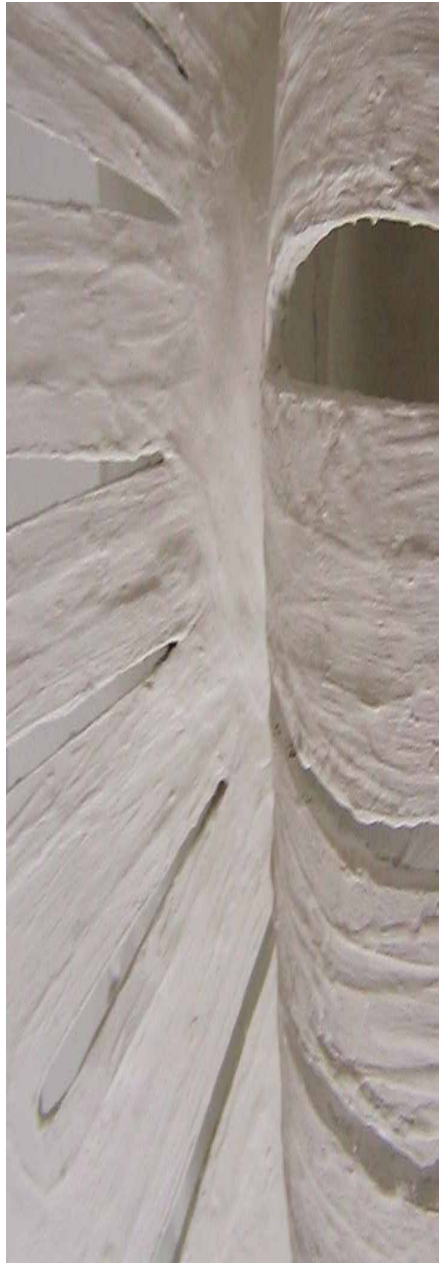
Men det også være samlet af præfabrikerede elementer med ikke synlige samlinger.

Konstruktionen skal placeres på land.

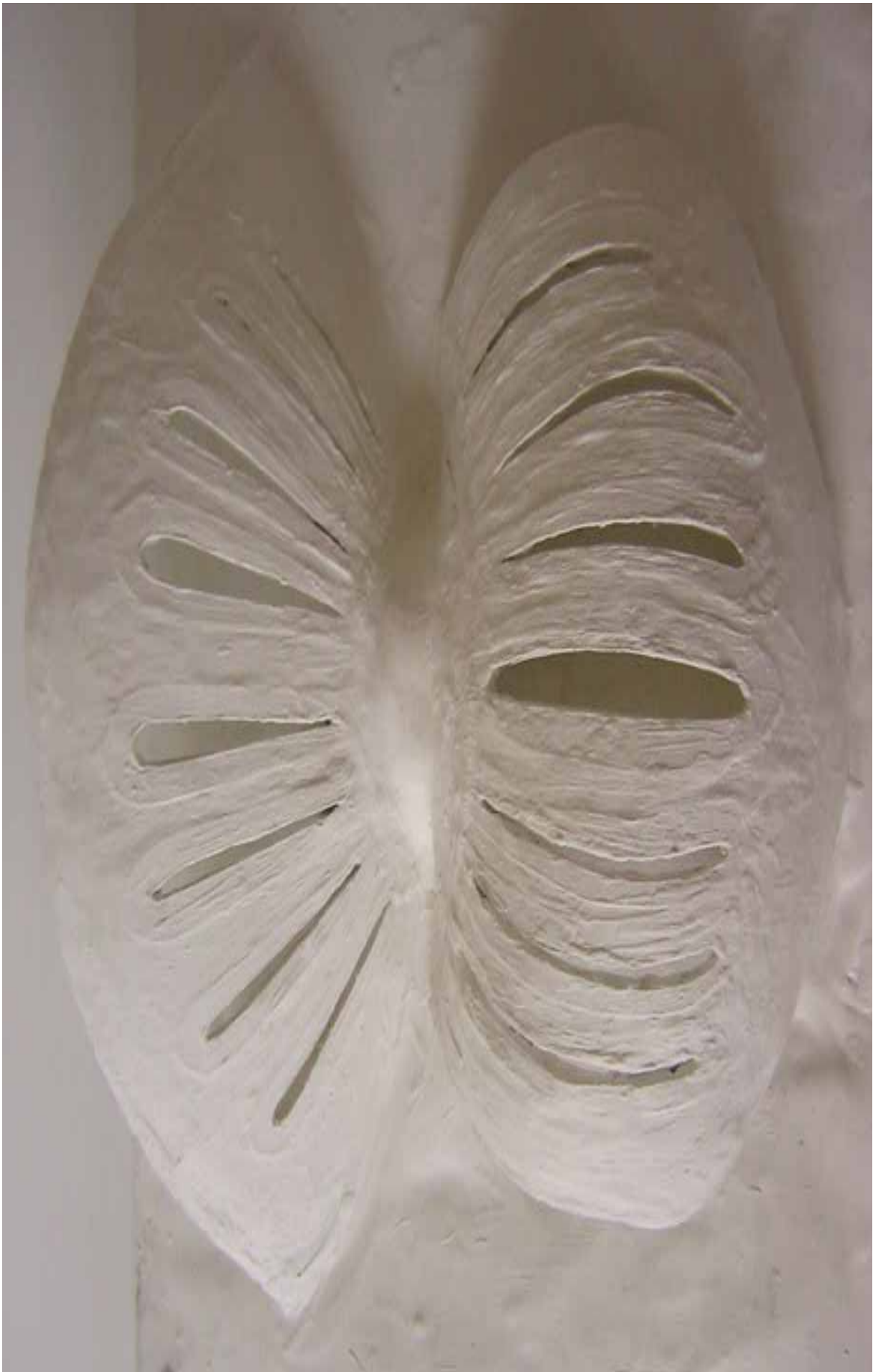












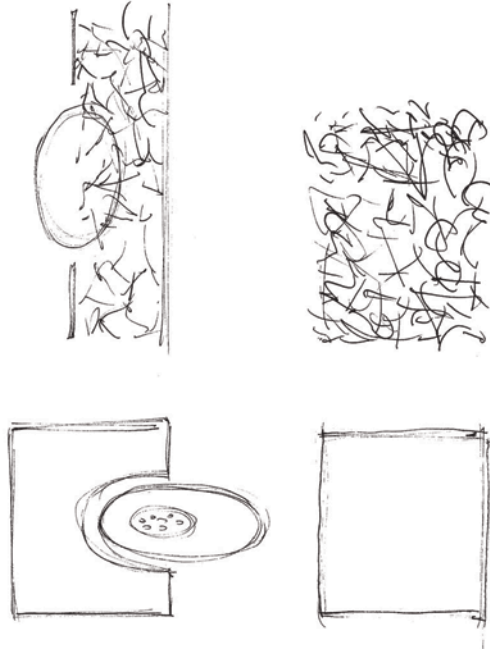




Model 8

Den ny betons form

Kæmpekonstruktion 8



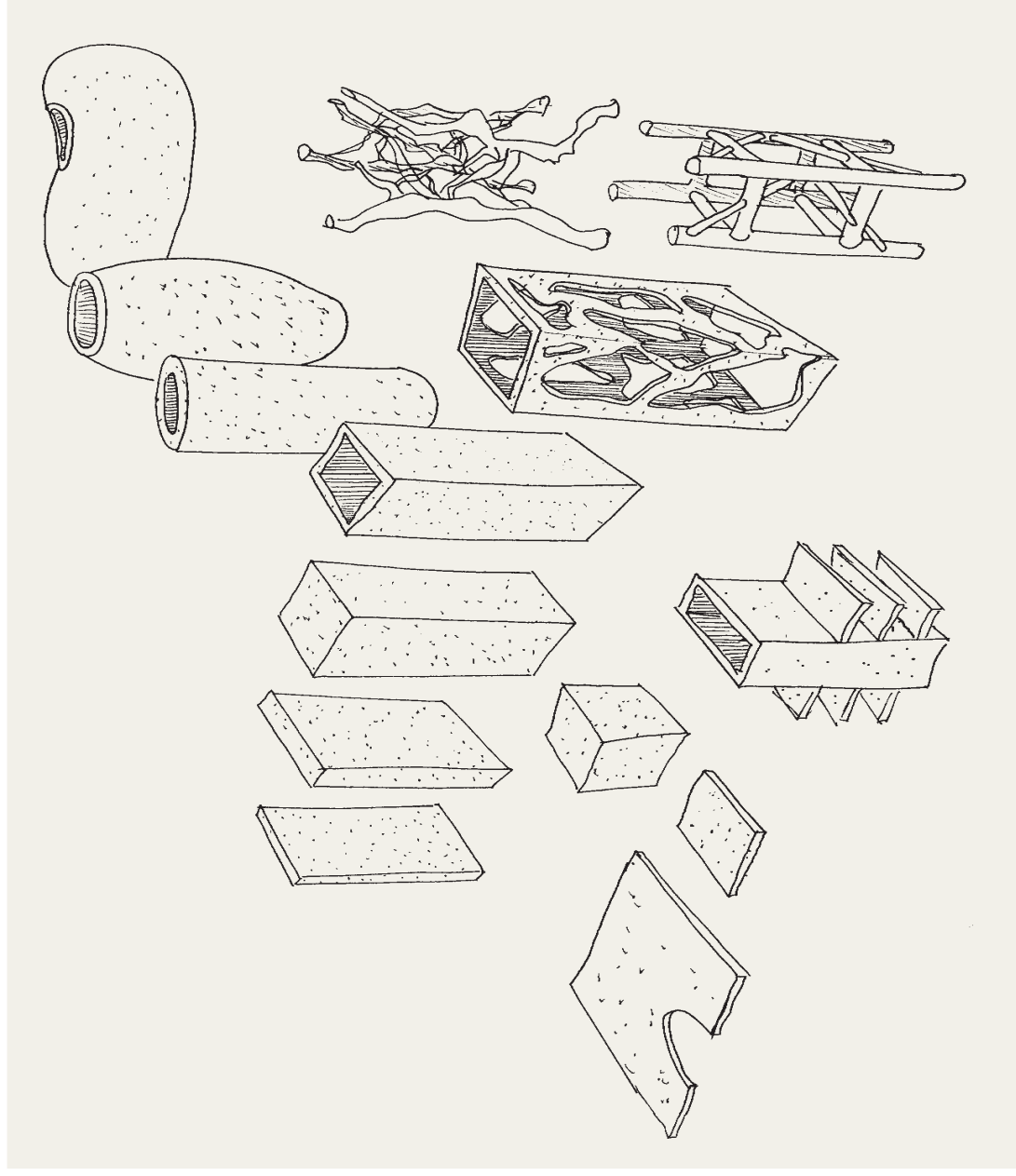
Model 8 består af en hul beholder, et "søjle-bjælkesystem", og et dækelement. Alt tænkes udført i ny beton.

Beholderen er amorft formet. Den består af en sammenhængende flade som lokalt er perforeret med cirkulære huller.

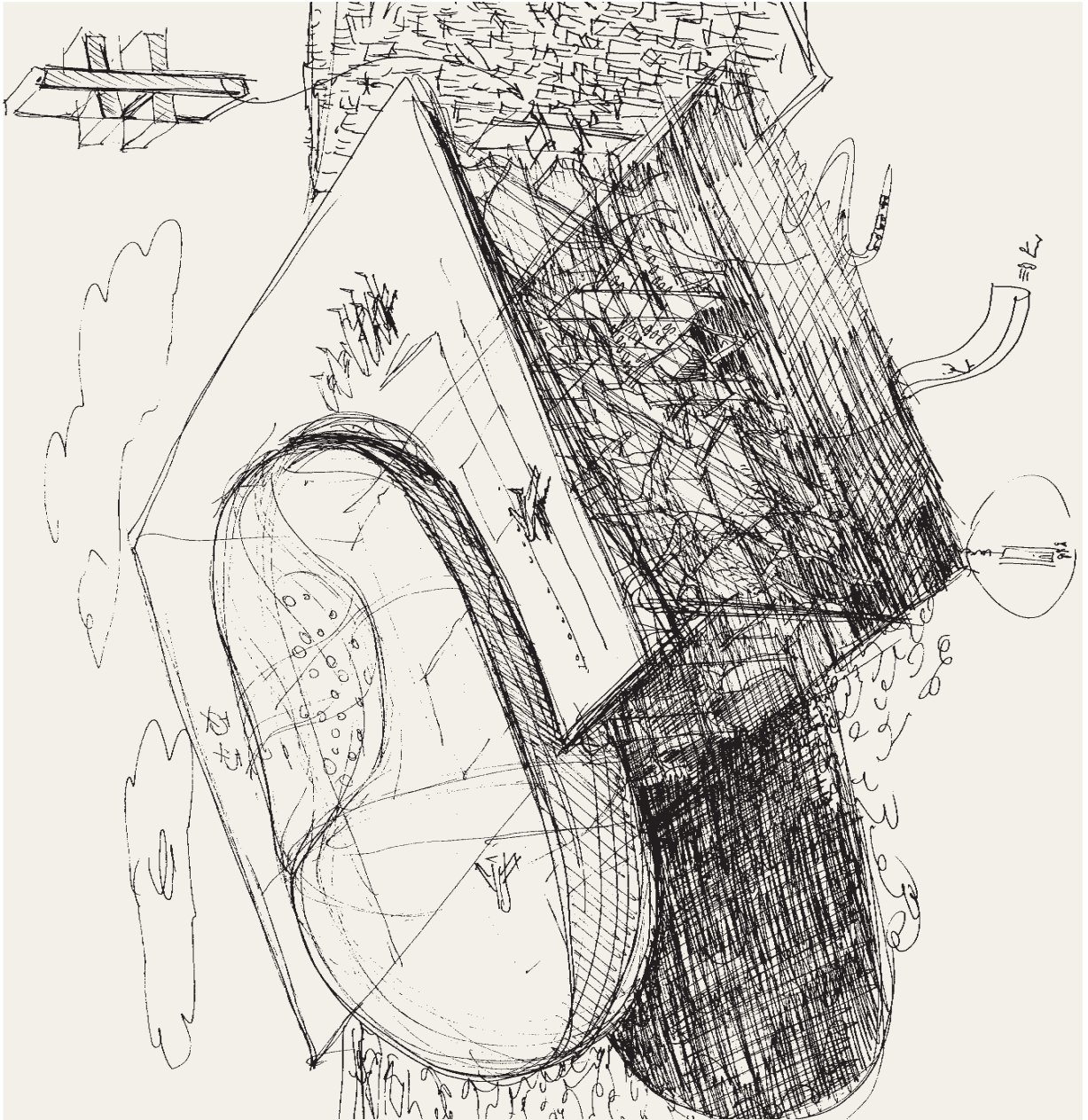
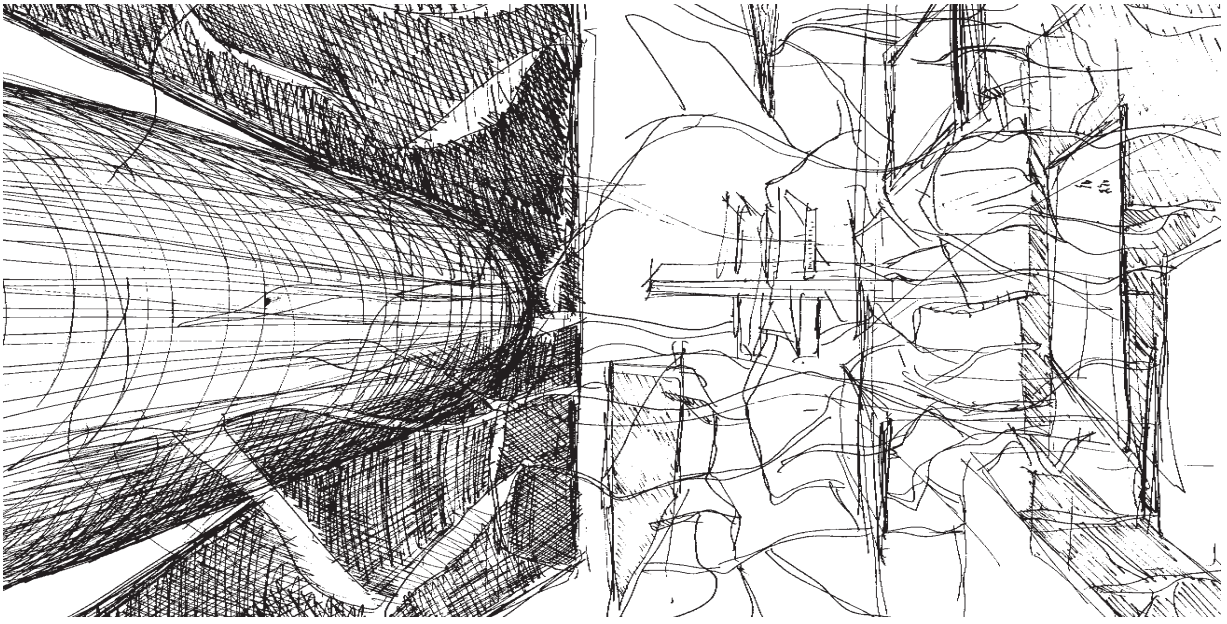
Søjle-bjælkesystemet er funderet. Det er udformet som et kaotisk netværk af organisk udformede diskrete profiler, der peger i alle retninger. Søjle-bjælkesystemet har meget varierende godstykkelser, de varierer både kontinuerligt, men også abrupt. Det formmæssigt tæmmende dækelement er plant og skarpt, som kontrast til det resterende.

Alle elementer er sammensat uden synlige samlinger.

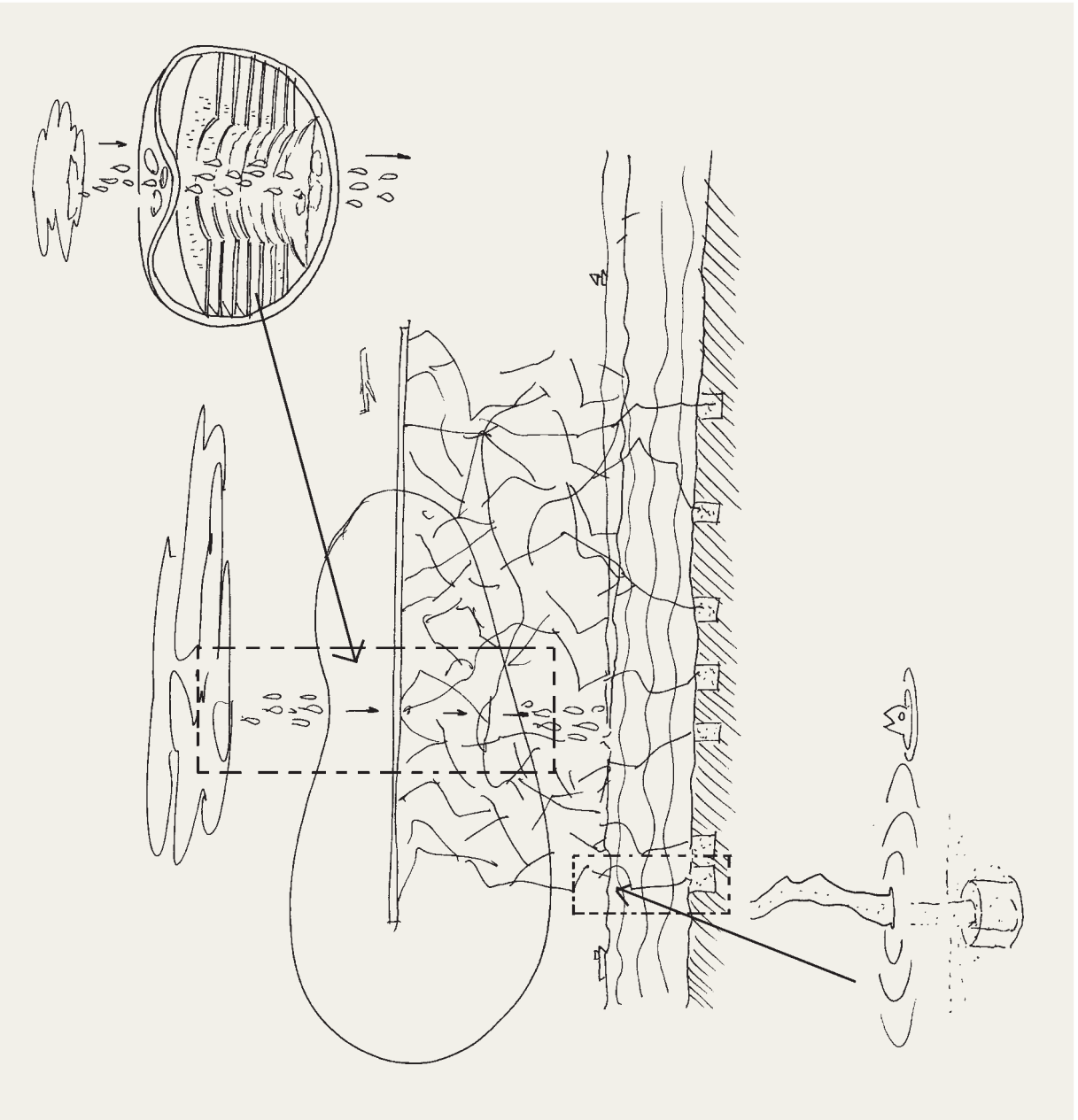
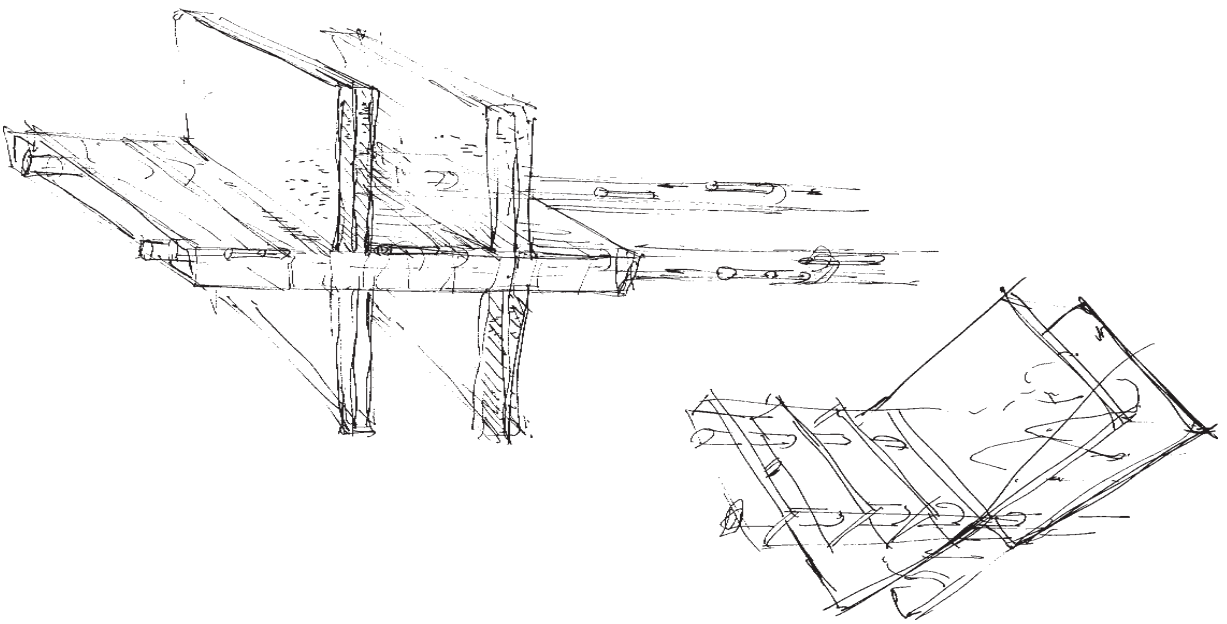
Kæmpekonstruktionen kan være placeret i vand, men også i vand.













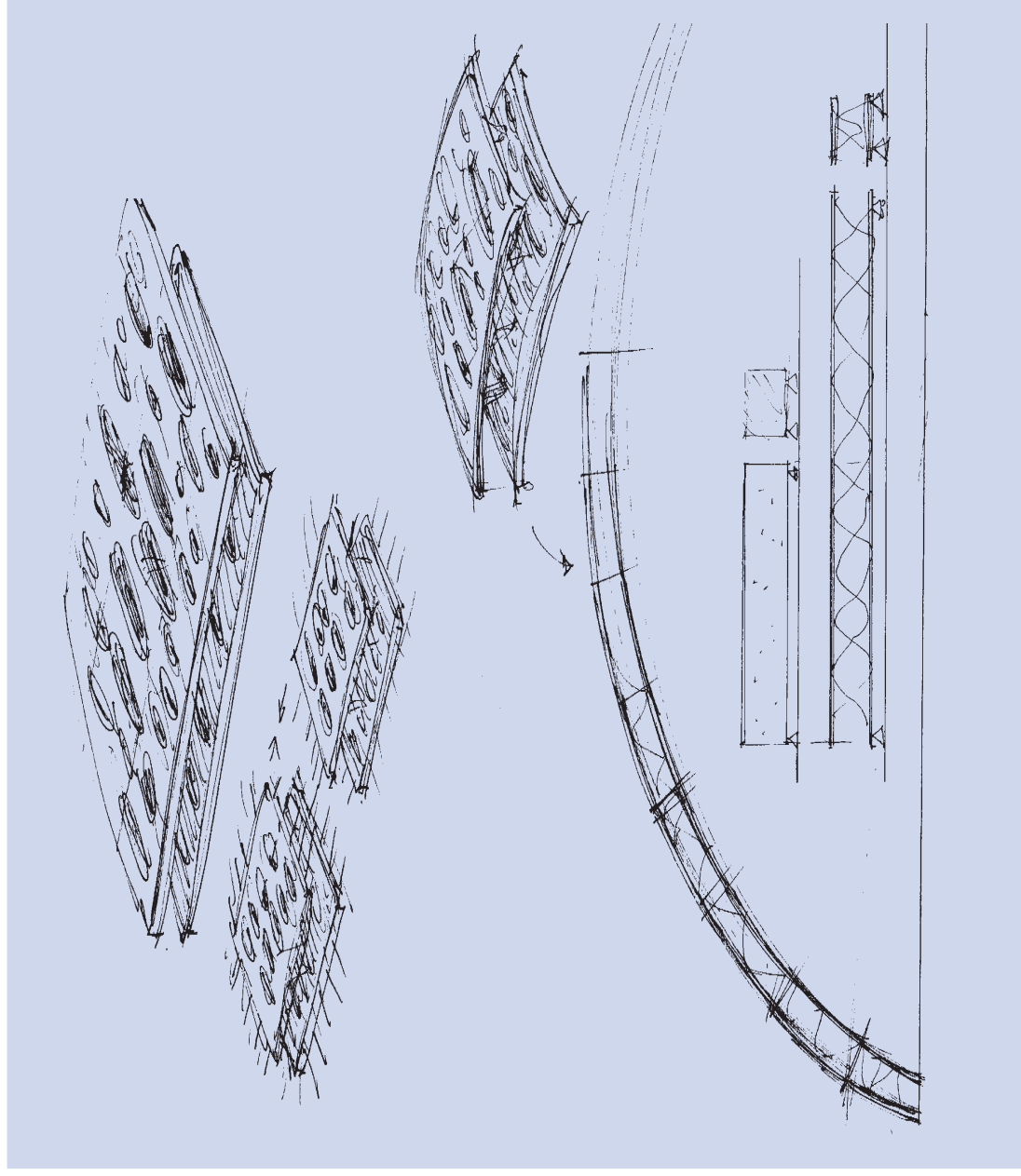
Model 9

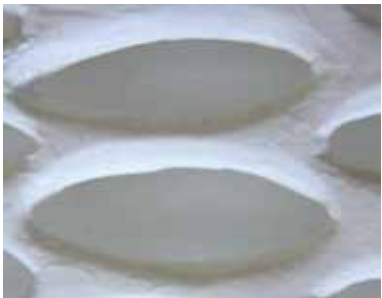
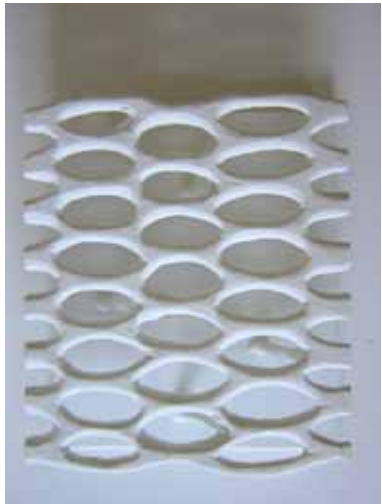
Den ny betons form

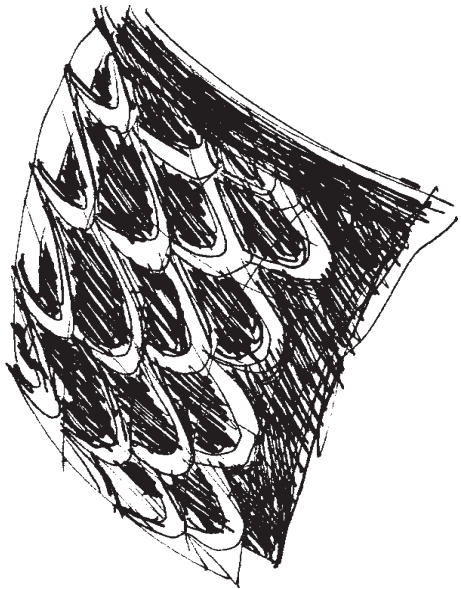
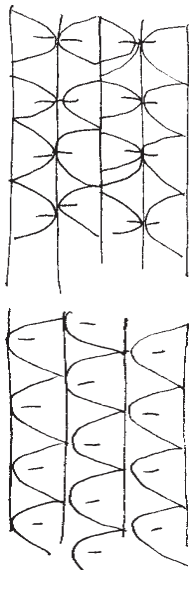
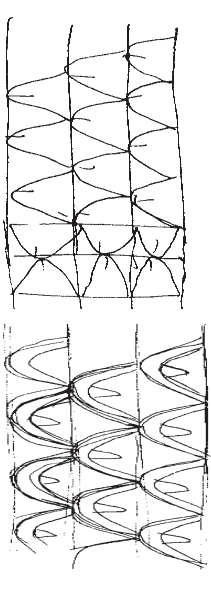
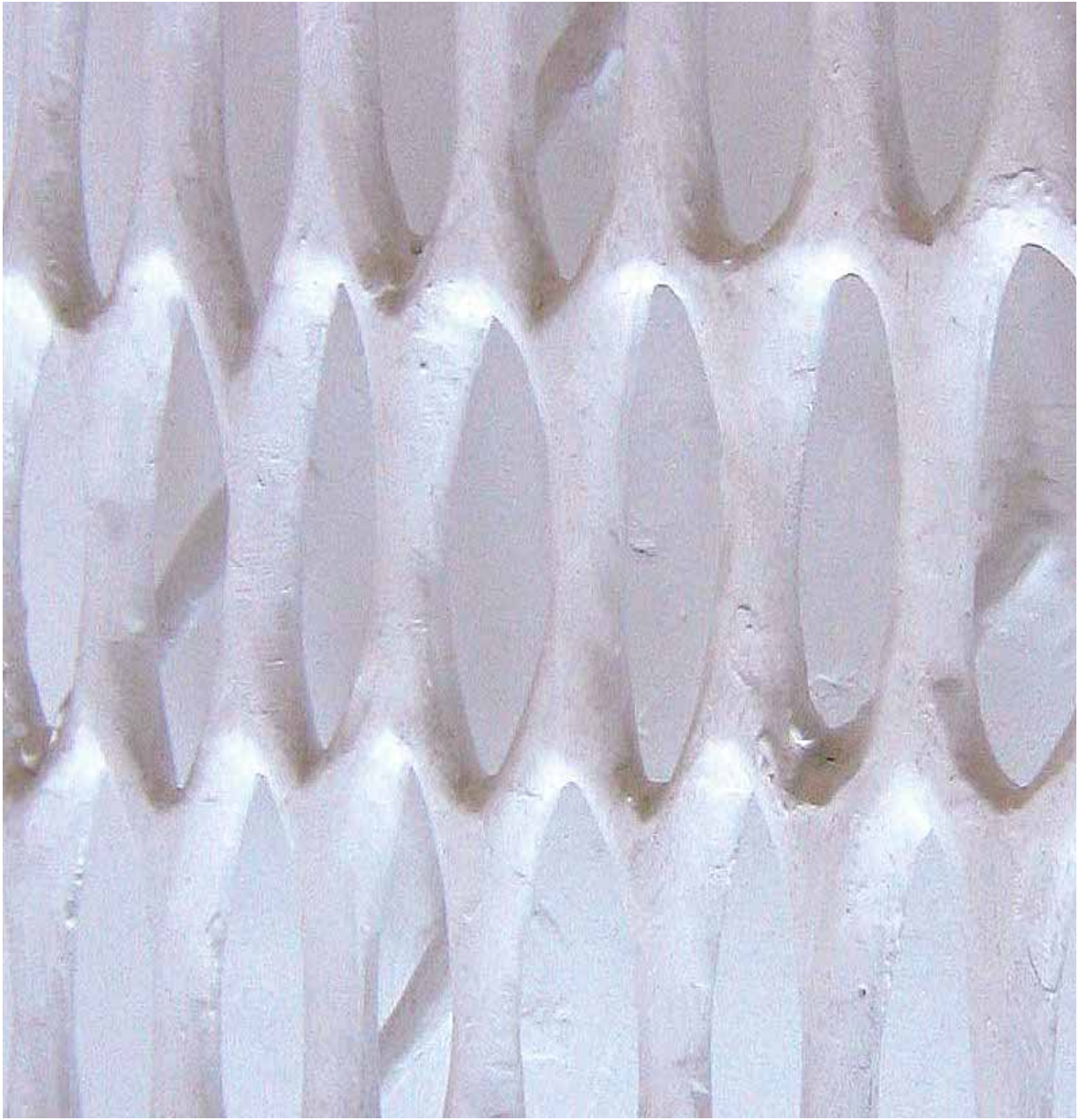
Kæmpekonstruktion detalje 9

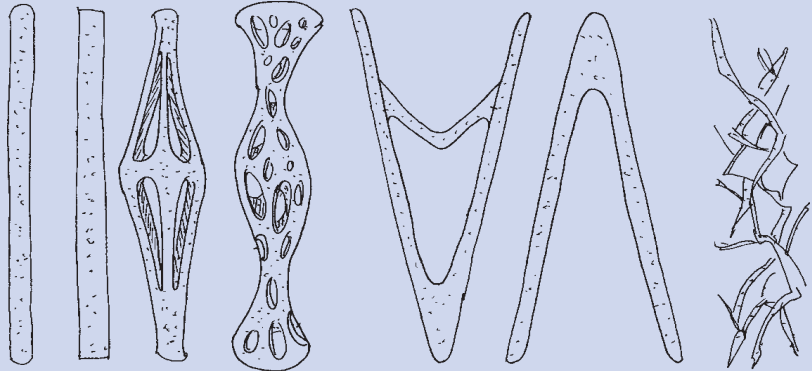
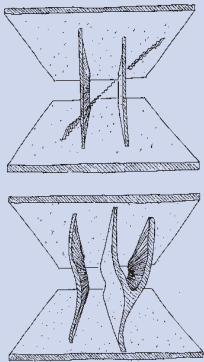
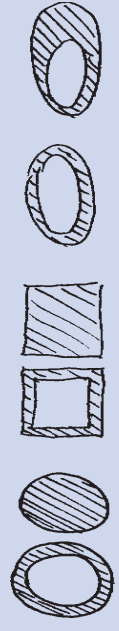
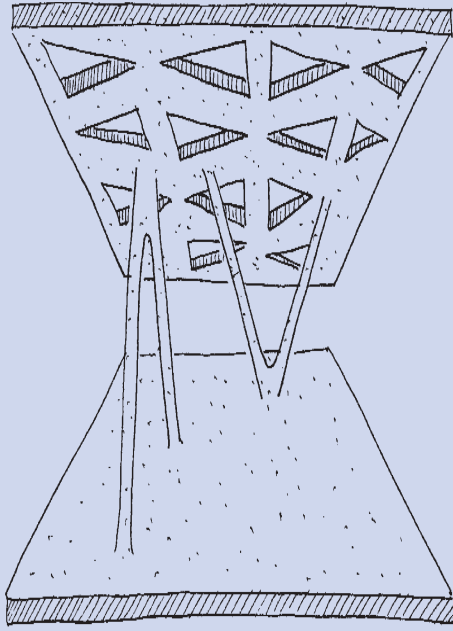
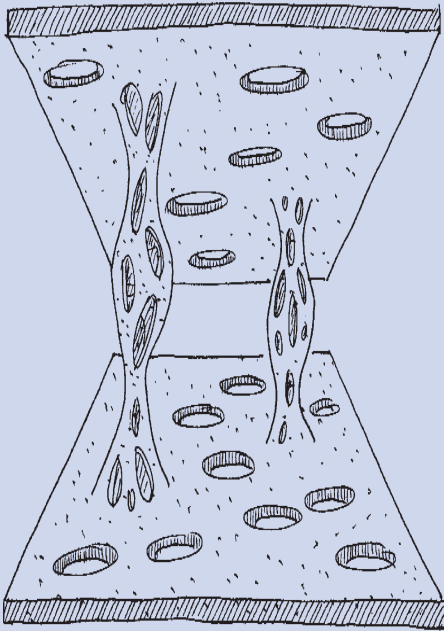
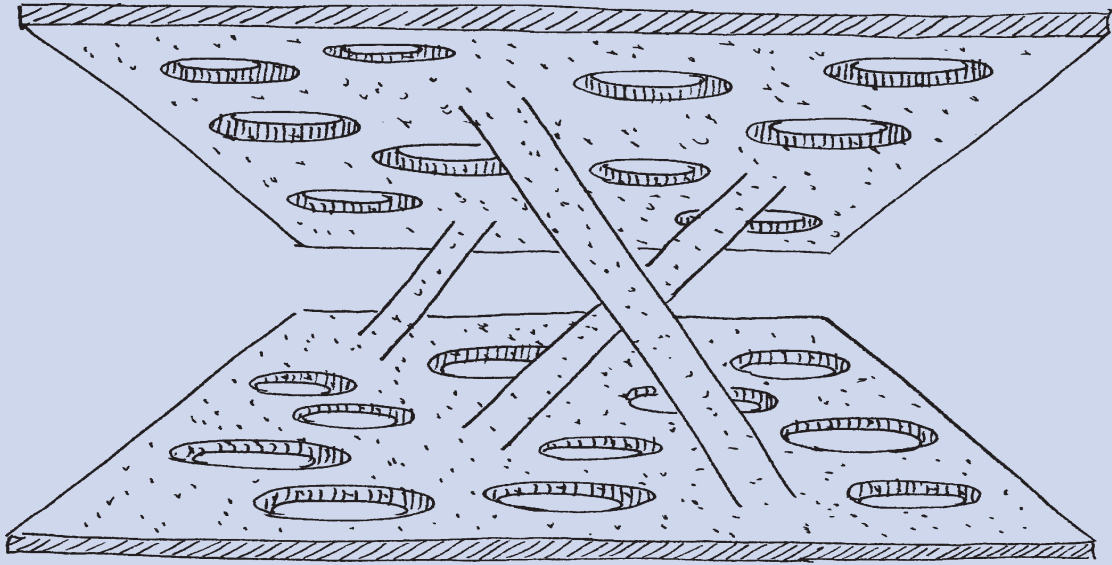
Der er i flere sammenhænge nævnt kæmpekonstruktioner med dobbelte vægge, eller som er opbygget af flere beholdere, den ene uden på den anden. Der er også nævnt at kæmpekonstruktioner kan være opbygget af præfabrikerede elementer. Model 9 er forslag til hvordan dobbeltvægget præfabrikerede elementer til kæmpekonstruktioner i ny beton kan se ud.

Det er et undersøgelsesfelt som jeg ikke, indenfor den tidsbegrænsede projektperiode, har kunnet undersøge tilbundsgående. Men nogle af de problematikker, der bør berøres i den sammenhæng er dels hvordan elementerne kan udformes, hvilke udfoldelsesmuligheder, der er for udarbejdelse af ubrudte mønstergange, eller for at lave mønstre, hvor samlinger er synlige og indgår i rytmen, samt hvordan eventuelle tværstivere i det dobbeltvæggede element skal udformes.

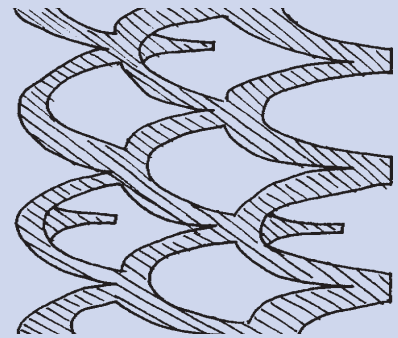
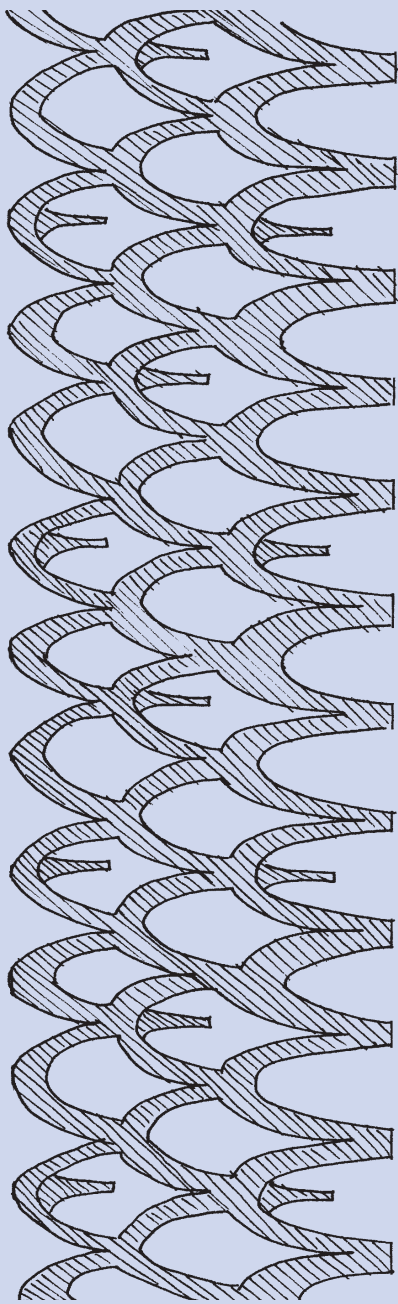
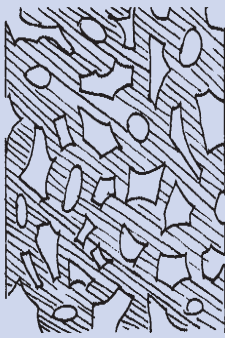
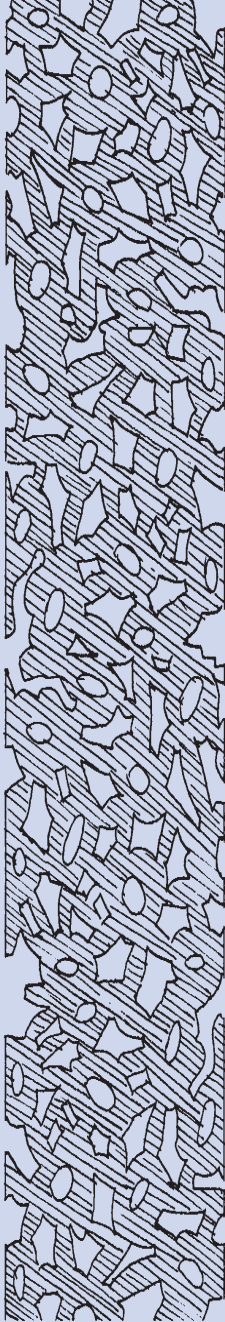
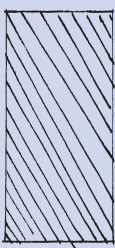
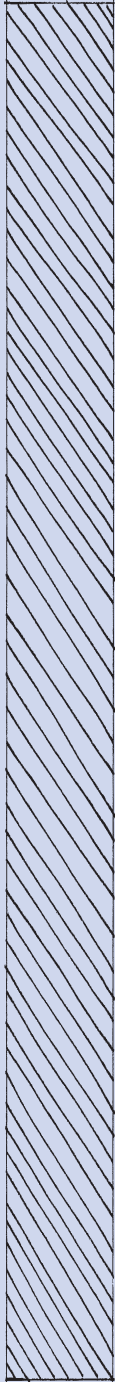
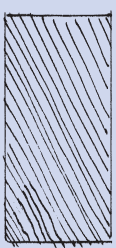
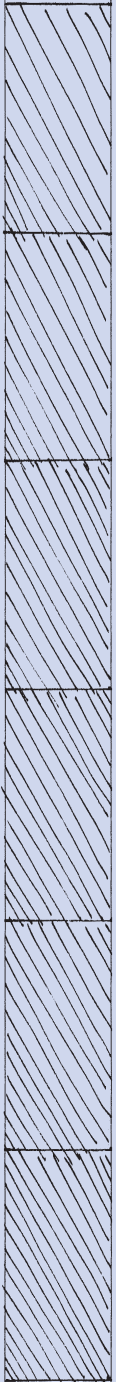








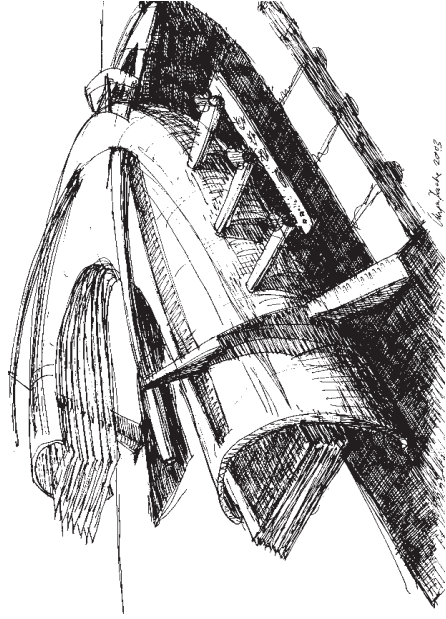




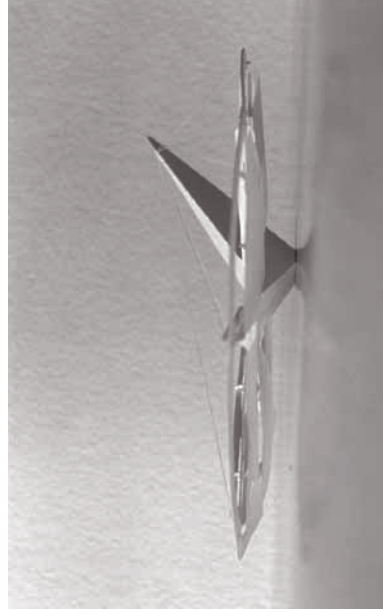


AFRUNDING

Projektet "Undersøgelse af en ny betons form for kæmpekonstruktioner" er afsluttet på grund af manglende finansiering, men ikke fordi det er færdigt. Der har i projektet været modeltekniske problemer, som har betydet at nogle designprincipper er prioriteret fremfor andre. For eksempel er de formmæssige visioner, der vises i denne rapport primært udsprunget fra designprincippet om at forme kæmpekonstruktioner i ny beton som store hule beholdere. Mens de i mindre grad er designet i forhold til det andet designprincip, hvor kæmpekonstruktioner er opbygget af diskrete slanke elementer, der statisk virker sammen som ét system. De modeller som er vist i rapporten er derfor ikke fyldestgørende for den vision omkring den ny betonteologiske formverden for kæmpekonstruktioner som jeg ønskede at levere. Alligevel håber jeg med denne rapport at få kastet nogle bolde i luften som andre griber og leger videre med.



Figur 1: Skitse af en vision omkring en kæmpekonstruktion i ny beton
Figur 2, 3, 4, 5, 6 og 7: Billeder af skitsemodeller i pap udsprunget af designprincippet om at udføre kæmpekonstruktioner i ny beton som en samling af diskrete elementer, der statisk virker sammen som ét.



LITTERATURLISTE

Litteraturliste, (tal)

1. Khan, Louis, 1973, Materials, Forelæsning ved Pratt Institute, School of Architecture, N.Y.
2. Bache, Anja Margrethe, 2002, Compact Reinforced Composite, Undersøgelse af en ny betonteknologisk arkitektoniske potentialer, vurderet ud fra holdbarhed, komfort og form, Aarhus, Arkitektskolen i Aarhus
3. Bache, Anja Margrethe, 1991, Dispergering og Flydeopførsel af finpartikel-væskesystemer med høj volumenkonzentration, Aalborg, Aalborg Portland A/S
4. Bache, Anja Margrethe, 1992, Undersøgelse af tilslag i frisk beton som funktion af bindemiddelsammenhæng og fremstillingsproces, CBL Rapport No. 50, Aalborg, Aalborg Portland A/S
5. Bache, Anja Margrethe & Henningsen, Poul, 1993, Kompositmaterialer, Lyngby, Danmarks Tekniske Universitet, Procesteknik Institut
6. Bache, Anja Margrethe, 1994, CRC-metal et brudmekanisk designkoncept, Lyngby, Danmarks Tekniske Universitet, Procesteknik Institut
7. Gordon, J.E., 1984, The New Science of Strong Materials, 3. edition, Prince, Prince University Press
8. Bache, Hans Henrik, 1992, Ny beton-Ny teknologi, Beton-teknik, 8/04/1992, Aalborg, Aalborg Portland A/S
9. Holliday, Leslie, 1996, Composite materials, Amsterdam, Elsevier Publishing Company
10. Richard, P. and Cheyrezy, M., 1994, Reactive Powder Concrete with high ductility and 200-800MPa Compressive strength, ACI.SP
11. Ridout, Graham, 1994, Helping the Pour, Building 11 marts, Concrete Special Feature
12. Bache, Hans Henrik, 1995, Concrete and Concrete technology in a broad perspective, the Second CANMAT/ACI International Symposium on Advances in Concrete technology, Las Vegas, Nevada, USA, June 11-14, Aalborg Portland A/S, CBL, Reprint no. 27.
13. Herholdt, Aage D. & Justensen, Chr. F. P. & Nepper-Christensen, Palle & Nielsen, Anders, 1985, Beton-bogen, 2.udgave, Aalborg, Aalborg Portland A/S
14. Bache, Hans Henrik, 1987, Højstyrkebetoners udviklingshistorie gennem 25 år, CBL, særtryk nr.17, Aalborg, Aalborg Portland A/S
15. Gjørsv, Odd. E., 1994, High Strength Concrete, Advances in Concrete Technology, Ed. Malhotra V. M., Canada, CANMET
16. Bache, Hans Henrik, 1970, Model for Strength of Brittle Materials Built up of particles joined at points of Contact, Journal of the American Ceramics Society, 53, 12 pp.
17. Bache, Hans Henrik, 1973, The Processing on Fresh Concrete, Physical Suvey, RILEM Seminar on Fresh Concrete, Leeds, England, BFL, Intern Rapport no. 189
18. Nielsen, Claus Vestergård, Ultra High Strength Steel Fibre reinforced Concrete, ABK, Afdelingen for bærende Konstruktioner, Lyngby, Danmarks, Tekniske Universitet
19. Jensen, Bjarne Chr., Teknisk Ståbi, 18. udgave, København, Teknisk Forlag A/S
20. Zwikker, C., 1995, Physical properties of Solid Materials, London, Pergamon Press
21. Bache, Hans Henrik, 1979, Densitpatent, International Patent Application no. PCT/DK/79/00047, "Shaped Article and Composite Material and Method for producing the same" 93 p.p.
22. Bache, Hans Henrik, 1987, International Patent Application No. PCT/DK/87/00072, "Compact Reinforced Composite"
23. Gallilei Gallileo, 1954, Dialogues Concerning Two New Sciences", Dover Publications Inc., New York

Billedhenvisning, (tal)

2. Bache, Hans Henrik, 1992, Ny beton - Ny teknologi, Beton-teknik, 8/04/1992, Aalborg Portland A/S
3. Aarup, Bendt, 2004, www.CRC-tech.dk, Hjallerup, CRC-technology, Østermarken 119, DK-9320 Hjallerup
4. Aalborg Portland A/S, Årstal mangler, CRC, datablad, Aalborg, Aalborg Portland A/S
5. Contec ApS, 2004, Contec ApS, bs@contec-aps.dk, Axel Kiær Vej 30, DK 8270 Højbjerg, 86721723

Litteraturliste til Den Konventionelle armerede betons historie, appendiks 1

- Gordon, J.E., 1976, 2.Edition, The New Science of Strong Materials, Princeton, Princeton University Press
- Bache, Anja margrethe, 1994, CRC-metal et brudmekanisk Designkoncept, Lyngby, Danmarks Tekniske Universitet, Procesteknisk Institut
- Gallilei Galileo, 1954, Dialogues Concerning Two New Sciences", Dover Publications Inc., New York

Litteraturliste til Konventionel armeret beton, appendiks 1, (tal)

- Gyldendals Iekikon, 1973, 2. oplag, Beton, København, Gyldendals Leksikon, bind 1, A-K, s.105
- Herholdt, Aage D.& Justesen, Chr.F.P.& Nepper-Christensen, Palle & Nielsen, Anders, 1985, Beton-Bogen, 2.udgave, Aalborg Danmark, Aalborg Portland A/S
- Cto, maj 1999, Cement og Beton, 13.reviderede udgave, Aalborg, Aalborg Portland A/S Cto
- Byggforskningsrådet, 1984, Betonens opbygning, Stockholm, Betonens Yta, Svensk Byggtjenst, s.51-7,
- Gordon, J.E., 1976, 2.Edition, The New Science of Strong Materials, Princeton, Princeton University Press
- Schulz, Regina & Seidel Matthias, 1998, Egypt, The World of the Pharaohs, Køln, Kønemann Verlagsgesellschaft mbH
- Jensen, Jesper Frøbert, 1991, Betonelementer 1, Vojens, Betonelement-Foreningen Møllerup, Jens, 1991, Hus-bygningsmaterialer, 5.udgave, 2. oplag, Danmark, Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck
- Henry J. Cowan, 1977, An Historical Outline of Architectural Science, second Edition, , Applied Science Publishers Ltd
- Cowan, Henry J., 1978, Science and Building, Structural and Environmental design in the nineteenth and twentieth centuries, N.Y., John Wiley & Sons
- Concrete the vision of a new architecture, a study of Auguste Perret and his preasors, Peter Collins, Faber and Faber, 24 Russel Square, London 1959
- Mateovics, Ernest , Spring, 1996, Nervis Matery of art in reinforced concrete. , Concrete Quaterly,
- Greco, Glaudi , Novembre 94, Domus Revista Internazionale diProgetto, Pier Luigi Nervi e il ferro-cemento, Domus 765, Novembre 94.
- Dupré Judith, 1996, Skyskrabere, N.Y., Kønemann
- Gordon, J.E., 1976, 2.Edition, The New Science of Strong Materials, Princeton, Princeton University Press

Billedhenvisning til Den konventionelle armerede betons historie, (tal)

- Schulz, Regina & Seidel Matthias, 1998, Egypt, The World of the Pharaohs, Køln, Kønemann Verlagsgesellschaft mbH
- Jensen, Jesper Frøbert, 1991, Betonelementer 1, Vojens, Betonelement-Foreningen Møllerup, Jens, 1991, Hus-bygningsmaterialer, 5.udgave, 2. oplag, Danmark, Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck
- Henry J. Cowan, 1977, An Historical Outline of Architectural Science, second Edition, , Applied Science Publishers Ltd
- Cowan, Henry J., 1978, Science and Building, Structural and

Anbefalet uddybbende litteratur om den ny betonteknologi

- B** Bache, Anja Margrethe, 1994, CRC-metal et brudmekanisk designkoncept, Lyngby, Danmarks Tekniske Universitet, Procesteknisk Institut
- Bache, Anja Margrethe, 2002, Compact Reinforced Composite, Undersøgelse af en ny betonteknologis arkitektoniske potentialer, vurderet ud fra holdbarhed, komfort og form, Aarhus, Arkitektskolen i Aarhus
- Bache, Hans Henrik, 1970, Model for Strength of Brittle Materials built up of Particles joined at Points of Contact. Journal of the American Ceramic Society, 53, 12 pp. S. 654-658,
- Bache, Hans Henrik, 1973, The Processing on Fresh Concrete. Physical Suvey. RILEM Seminar on Fresh Concrete, Leeds, Englang, BFL, Intern Rapport nr. 189
- Bache, Hans Henrik, 23.02.1981, Udviklingen fra beton til Densit, CBL Interne rapport No. 26, Aalborg, Aalborg Portland A/S
- Bache, Hans Henrik, 10-12. June 1981, Densified cement/ ultra-fine particle-based materials, The second International Conference on Superplasticizers in Concrete, CBL rapport nr.40, Ottawa, Aalborg, Aalborg Portland A/S
- Bache, Hans Henrik, 1987, Introduction to Compact Reinforced Composite, Oslo, Nordic Conceret Research, Publication No.6, Paper p.19-33, Nordic Concrete Federation (ed.)

F

- Forfatter mangler, udgivelsesår mangler, Note: ISO-Fire testing CRC, Intern rapport Aalborg Portland A/S
- Forfatter mangler, Årstal mangler, Mekaniske egenskaber for CRC-matricen, Aalborg, Internt notat Aalborg Portland A/S

S

- Forfatter mangler, Årstal mangler, „Ministruct Material Properties for compresit Matrix“, Odense, Carl Bro A/S

G

- Gjørsv, Odd. E., 1994, High Strength Concrete, Advances in Concrete Technology, Ed. Malhotra V.M., Canada, CANMET

H

- Hesche, Gert, 1988, Experimental research on Compact Reinforced Composite, (CRC), Beams, Aalborg, Aalborg Portland A/S
- Hesche, Gert & Nielsen, Claus V., September 1993, EU264 – Compresit, Technical Report Subtask 1.11- High Thermal Loading, Aalborg, Aalborg University

J

- Holmbo, Anita, 2000, Beregning af miljøprifil for CRC 2000, Aalborg, Internt notat fra Aalborg Portland A/S

J

- Jensen, Bjarne Chr. & Aarup, Bendt, 1996, Fire Resistance Of Fibre Reinforced Silica Fume Based Concrete, 4.th. International Symposium on Utilization of High-strength/ High-performance concrete, Paris 1996, Udgivelsessted mangler, Forlag mangler
- Jensen, Lars Rom, Januar 2001, Kraftoverførende samling af betonelementer, Byggeindustrien Byggeforum, nr.1, Januar 2001, Kbh

- Bache, Hans Henrik, 1987, Højstyrkebetons udvikling gennem 25 år, CBL særtryk nr.17, Aalborg, Aalborg Portland A/S

- Bache, Hans Henrik, 1988, The New Strong Cements: Their use in Structures, CBL Reprint No.16, Aalborg, Aalborg Portland A/S

- Bache, Hans Henrik, 1990, Brudmekanik, Beton-teknik 3/12, Aalborg, Aalborg Portland A/

- Bache, Hans Henrik, June 24-26 1991, Principles of Similitude in Design of Reinforced Brittle Matrix Composites, International Workshop „High Performance Fiber Reinforced Cement Composites“ Mainz Germany, CBL Reprint no.23, Aalborg, Aalborg Portland A/S

- Bache, Hans Henrik, 1992, Ny beton - Ny teknologi, Beton-teknik, 8/04/1992, Aalborg Portland A/S

- Bache, Hans Henrik, 1995, Concrete and Conceret Technology in a broad perspective, the Second CANMET/ ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, Nevada, USA, June 11-14, Aalborg Portland A/S, CBL, Reprint no. 27

D

- Densit A/S, Datablade fra Densit A/S, omkring Densitop MT og Densitop ST, Densit A/S,

- Duedahl, Thomas & Nielsen, Martin Svenning, 1993, Beregningsmodel til bestemmelse af spændings- og deformationstilstanden for bøjningspåvirkede CRC-bjælker, Aalborg, Aalborg Universitet

K

Klinghoffer, O & Aarup, Bendt, 1-4 July 1996, Effect of microcracks on durability of Ultra High Strength Concrete", 4th. International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, Cambridge, Robinson College

M

Modér, Arstal mangler, A Fracture Mechanic to Failure of Concrete Materials, Lund, University of Lund

N

Nielsen, Claus Vestergård, 1995, no.323, Ultra High Strength Steel Fibre Reinforced Concrete, Lyngby, ABK, Afdelingen For Bærende Konstruktion DTU

A

Aarup, Bendt, år 1997, Fiber Reinforced High Performance Concrete for Precast Applications, Intern Aalborg Portland paper, Aalborg Portland A/S, Aalborg Danmark

Aarup, Bendt, 17-19 May 1997, Cambridge, Fibre Reinforced high Performance concrete for precast applications, 2nd. International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, Robinson College

KONVENTIONEL ARMERET BETON

Appendiks 1

Definition af konventionel armeret beton

Konventionel Beton er defineret som en kunststen, der er fremstillet af et hærdende bindemiddel¹, en væske², og fyldmateriale³. Ordet beton bruges især om "cement-beton", det vil sige at det hærdnende bindemiddel er fremstillet af cement. (1). Det er cement-beton, der behandles her⁴.

Cement er et hydraulisk bindemiddel, det vil sige et pulverformet bindemiddel, der hærdner⁵, ved reaktion med og under vand, til et produkt, der er bestandigt i vand. (2).

Der er flere cementtyper⁶, portlands cement er den hyppigst anvendte. (3). Portlands cement fremstilles ved formaling af portlandsklinker, en lille mængde gips og eventuelt små mængder af uorganiske materialer. Portlandsklinker er fremstillet af materialer, der findes i kalksten, kridtaflejninger, muslingeskaller i skiffer, sand og aske⁷.

Armeret beton er defineret som beton, der er armeret med slap eller forspændt armeringsstål og eventuelt med fibre.

Uarmeret beton anvendes til konstruktioner, der ikke eller kun i beskeden grad udsættes for trækpåvirkninger. Armeret beton anvendes til træk- og bøjningspåvirkede konstruktioner. (2).

En binder er et overordnet begreb for den del af materialet, der binder nogle andre dele sammen. Det bruges normalt om cementbinderen, der i beton binder tilslag sammen, men kan også være en mørtel, der binder betonens grovere tilslag sammen. En mørtel er en betonblanding, hvor de største tilslag ikke er større end 4 mm. Er der tilslag, der er større end 4 mm, er det ikke en mørtel, men en beton.

Note 1: F.eks. cement, puzzoloner, flyveaske, m.v.

Note 2: F.eks. vand

Note 3: Tilslag: sand og/eller sten

Note 4: Det er valgt fordi det er den beton, der primært anvendes i byggeriet, og fordi også de Nye betoner indeholder cement som bindemiddel

Note 5: Opnår styrke

Note 6: Portlands cement, modificeret Portlands cement, Blandings cement, Aluminat cement, Sorel cement, m.v. (4)

Note 7: Portlandsklinker kan fremstilles af calciumsilikater, der fremkommer ved at brænde, delvis smelte homogene blandinger af stoffer af calcium, silicium, aluminium og jern, der kan findes i: kalksten, kridtaflejninger, muslingeskaller i skiffer, sand og aske samt højovneslagge. (2).

KONVENTIONEL ARMERET BETONS HISTORIE

Appendiks 1



Indledning

Dette kapitel er et resultat af et litteraturstudium gennemført i mit ph.d.-projekt (2). Formålet med litteraturstudiet var at undersøge de teknologiske udviklingstrin, der var sket indenfor den konventionelle armerede betons historie. Det var formålet at undersøge om der var udviklet andre teknologier som den ny betontechnologi, Compact Reinforced Composite. Det var der ikke. Der er valgt kun at medtage de udviklingstrin, som jeg finder er relevante i forhold til den ny betontechnologi. Det er udviklingstrin som opfindelsen af cement, af den armerede beton, af den forspændte beton og det er opfindelsen af ferrocement.

Cements historie

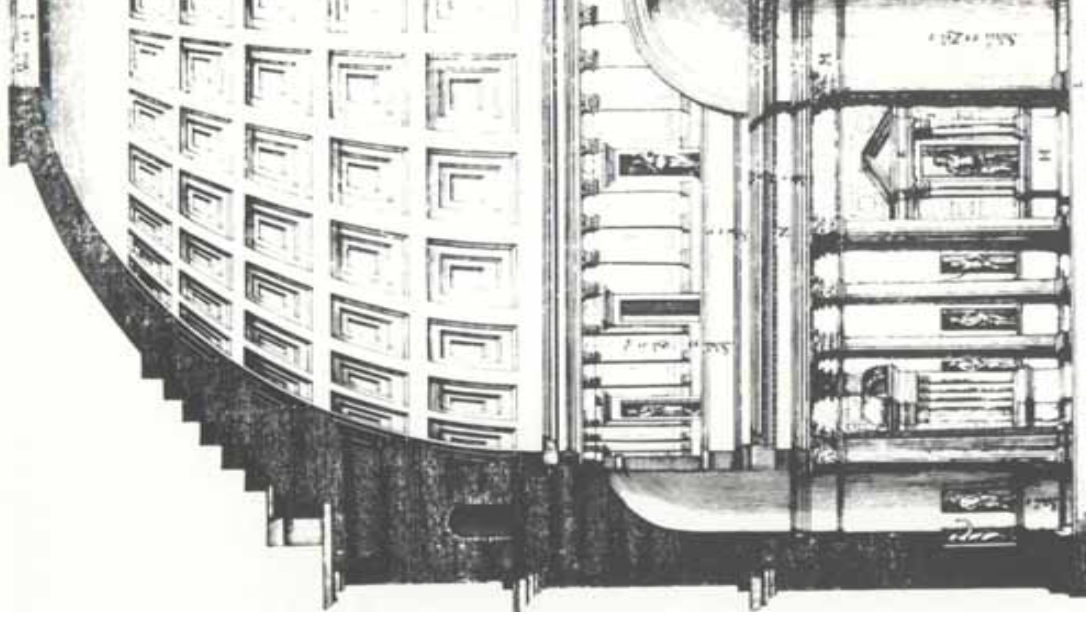
Den konventionelle armerede betons historie indledes med opfindelsen af det hydrauliske bindemiddel, cement. Både ægypterne og grækerne kendte til cementlignende bindemidler. Ægypternes cementlignende bindemidler var fremstillet af brændt gips. (1) og blev for eksempel brugt til at lime de store forarbejdede stenblokke sammen ved opførslen af pyramiderne Keops fra 2600 f.kr. (2) og til pyramiden Giza fra 2500 f.kr. (4). Ca. 2400 år efter opførslen af pyramiden Giza, omkring 30 –10 f.kr. beskrev ingeniøren og arkitekten Vitruvius i bog nr. to, kapitel VI, pozzolan, brændt kalk og tuf, der blandet med vand blev til en hård masse. (5).

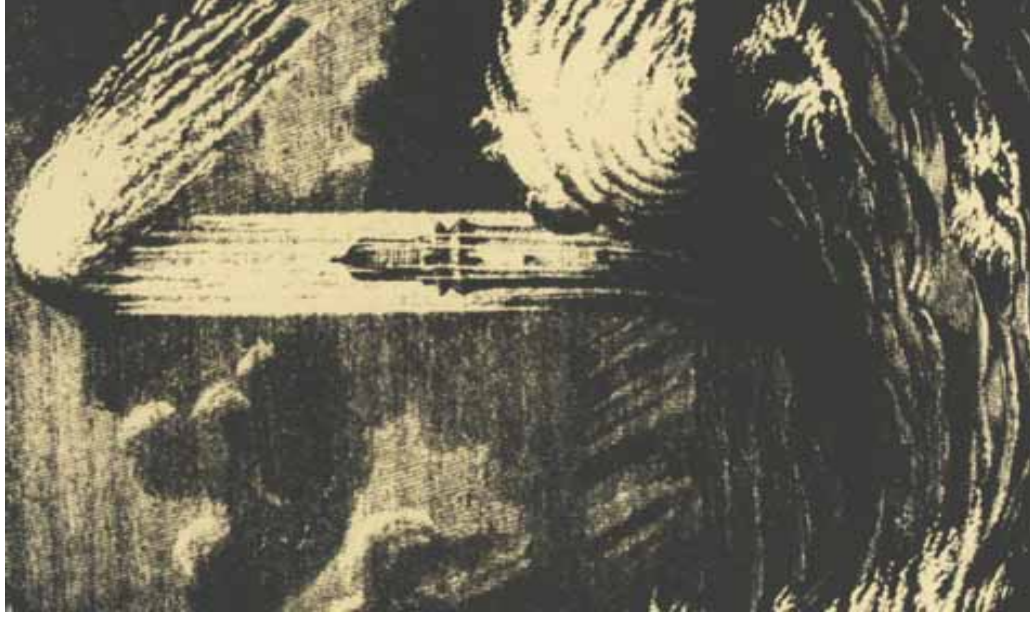
Når derfor kalken, pozzolanen og tuffen, der alle skabes efter samme princip ved ildens kraft, blandes forener de sig med hinanden med vandets hjælp og fugten får dem hurtigt til at hærde til en masse som hverken "Vågorna" eller vandets kraft

Figur 1. Pyramiden Giza 2500 f.kr. (1).

Figur 2. Pantheon i Rom, 120 e.kr. (2).

Figur 2. Snit af Pantheon i rom, 120 e.kr. (2).





Figur 3. Eddystones fyrtårn, 1750. (4).

kan bryde¹. (5).

Pozzolan og brændt kalk er cement. Når cement blandes med tuf bliver det en mørtel. Vitruvius beskrev cement og mørtel. Han skrev at denne mørtel var fremstillet af delmaterialer, der kun findes i nærheden af vulkaner, fordi de skal være bearbejdet af vulkanens ild. (5).

Med romerriget implementeredes den første cement i byggeriet, her iblandt Pantheon, der er fra 120 e.kr. Romerne anvendte en cement og mørtel, der svarede til den Vitruvius havde omtalt. Cementen bestod af brændt kalk og vulkansk aske og mørtlen fremkom ved at blande tuf i. Romerne brugte to slags tilslag og fik derved to slags betoner. Den ene beton, der primært blev brugt til gulve, blev kaldt *opus signium*. Den bestod af den omtalte mørtel samt af potteskår eller brudte mursten som tilslag. Den anden beton, der primært blev brugt til store konstruktioner, blev kaldt *opus caementium*. (4). Den bestod af den omtalte mørtel, der var støbt omkring store natursten eller murbrokker og stenbrokker fra tidligere byggerier. Pantheon består af *opus caementium*, store stykker sten, der er placeret i horisontale lag, hvor imellem cementmørtlen er støbt². (4).

Med romerrigets fald forsvandt brugen af cement i næsten 1600 år. Cement beskrives enkelte steder. Det er i for eksempel Daniele Barbaros oversættelse af Vitruvius ti bøger til italiensk i 1556 og i Andrea Palladios oversættelse af fire af Vitruvius bøger fra 1570. (5). Men det var først i 1750 da den engelske ingeniør John Smeaton, (1724-1792), fik til opgave at udføre et nyt fyrtårn på Eddystone i England at der opstod en ny interesse for udvikling af cement³. Smeaton forskede i byggematerialer. Han lavede en række eksperimenter for at finde den bedst egnede mørtel til fyrtårnet. Mørtlen skulle anvendes til at låse de kileformede sten sammen i et kompliceret forbåndt. Smeaton kendte til Vitruvius ti bøger om arkitektur og han kendte til de romerske betoner. (2). Men han var interesseret i

at udvikle mørtler, der var baseret på globalt forekommende delmaterialer. Han forsøgte i sine forsøg især på at finde andre anvendelige kalktyper.

Smeaton fandt frem til kalktyper, der forekom globalt og fandt frem til at denne kalk med vand ligeledes kunne bruges som en binder. Men Smeaton endte alligevel med at anvende den mørtel som romerne anvendte, til opførelse af Eddystone fyrtårnet. Han skaffede delmaterialer fra Civita Vecchia fra det nordlige Italien, til fyrtårnet. (2).

Smeatons undersøgelser lagde grunden til udviklingen af det industrielt fremstillede cement. Teglbrienderen Joseph Aspdin havde læst Smeatons skrifter og kunne i 1824 patentere Portlandcement⁴. Aspdins Portlandcement blev fremstillet af ler og kalk. Han brændte kalken, derefter tog han noget ler og blandede det med vand, hvorefter han blandede den brændte kalk og den opstemmede ler og lod det tørre enten i solen, eller ved anden opvarmning, så vandet kunne forsvinde. Derved opnåede Asdin store klumper af materiale som han så findelste til mindre klumper.

Derefter behandlede han⁵ klumperne i en ovn så kulsyren forsvandt. Denne brændte blanding blev så fordelt og formalet til fint cementpulver:

Note 1: Oversat fra svensk, men ordet vågorna, kan undertegnede ikke finde en oversættelse for.

Note 2: Pantheons kuppel er støbt ved at støbe ovenpå en negativ form lavet af jord, der svarer til hulrummet i Pantheon.

Note 3: De to ældste fyrtårne var gået til grunde

Note 4: Men forinden Asdins epokegørende opfindelse skal lige nævnes doktor Joseph Parkers patent på Romersk cement fra 1796. Den romerske cement som

Parker patenterede havde dog intet at gøre med den romerne anvendte og ifølge Von Cementum zum Spannbeton I, (2), ikke meget med cement i det hele taget at gøre.

Note 5: Kalcinerede.

Meine methode, Cement zu machen oder Kunstliche Steine fur Stuckarbeiten, Wasserbauten, Zisternen oder andere in Frage kommende Bauarbeiten ist folgende:

Ich verwendete ein bestimmtes Quantum Kalkstein der Art, wie er allgemein zur Herstellung und Reparatur von Strassen gebraucht wird, und nehme es von einer strasse, nachdem es zu Schlamm oder Pulver zerkleinert ist, wenn ich keine genugende Menge von Strassen beschaffen kann, nehme ich den kalkstein selbst und brenne den Schlamm, den pulver oder den kalkstein was gerade anfaellt, bis zyr Calcination. Dann nehme ich ein bestimmtes Quantum Ton oder Lette und schlaemme sie mit wasser bis zum Zustande angenaeheter Unfyhbarkeit, entweder mit Hand- oder Mascinarbeit. Nach diesem Prozess bringe ich obige Mischung in eine glatte pfanne zum Zwecke der Ausdunstung entweder mit Hilfe der sonnenhitze oder dadurch, dass ich sie der Einwirkung von Feuer oder Dampf unterwerfe, bis das Wasser vollstaendig verdunstet ist. Dann breche ich besagte Mischung in passende Klumpen und calciniere sie in einem Scachtofen, aehnlich einem Kalkofen, bis die Kohlensaure gaenzlich ausgeschlagen ist. Die so gebrannte Mishung wird abgezogen, zerschlagen und zu einem feinen Pulver gemahlen und ist dann in tauglichem Zustand fyr die Herstellung von Cement oder kynstliche Steinen . Dies pulver ist mit einer genygenden Menge Waser bis zur Mørtelkonsistens zu mischen und ist so passend fyr die gewynschten Bauerarbeiten. (2).

Aspdin betragtede portlandcement som et materiale, der kunne simulere Portland sten. Titten på Aspdins patent for Portlands-cement var: "The Modes of Producing an artificial stone". (6). Navnet Portland opstod af kommercielle hensyn.(2). (7). I 1825 startede Aspdin verdens første cementfabrik i Wakerfield England, med produktion af Portlandcement. De første fabrikker udenfor England opstod i Frankrig i 1840, i Tyskland i 1855, i

Danmark i 1861-67¹, i USA i 1871 og i Australien i 1889. (4). Aspdins Portlands cement kan produceres industrielt og overalt, hvor der er ler og kalk. Den fremstillingsmetode Aspdin angav i sit patent er i store træk også den metode, der anvendes i dag på cementfabrikkerne til fremstilling af portlands cement.

Portlands cement er i dag den mest anvendte cementtype til den konventionelle beton. (8). Den fremstilles på store cementfabrikker verden over ved de to fremstillingsmetoder, vådmetoden og tørrmetoden.

Den armerede betons udvikling

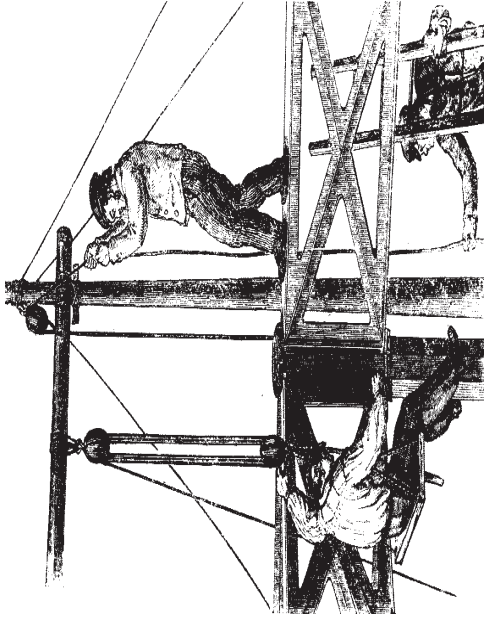
Aspdin levede i en tid, hvor der som følge af den industrielle revolution skete store forandringer både med hensyn til fremstillingsprocesser, men også i forhold til en centralisering af arbejdspladser² og i forhold reorganisering af samfundsstrukturen i det hele taget. Der skød nye fabrikker op, der husede nye funktioner og store nye maskiner. Der var mange folk, der på fabrikker arbejdede under samme tag. Det skabte behov for nye bygningstyper til at huse disse funktioner. Der var behov for større spændvidder, flere etager, samt brandsikre konstruktioner. Der var også behov for udvidet transportnet, med opførsel af nye stationsbygninger og haller. De store massive og tunge murværksbygninger kunne vanskeligt leve op til de nye krav. Det var i disse tider at jernet gjorde sit indtog som konstruktioner. Jernet kunne som smedejern optage træk og støbejern optage tryk. Det havde store styrker og kunne i flere sammenhænge erstatte det tunge massive murværk. Jernet kunne bidrage til mere åbne grundplaner og større spændvidder. Jernet blev brugt i mange industrielle sammenhænge som maskiner og inden for transportvæsenet og var derfor et velkendt og afprøvet materiale. Jernet blev først indført som bærende konstruktionselementer i fabrikker, og stationsbygninger. Den første anvendelse var som støbejerns-

søjler indvendigt, så som smedejernsbjælker indvendigt, men sidenhen også som søjler og bjælker udvendigt. I 1844 indførtes den første jernramme, hvor murenes funktion kun var at bære deres egen vægt. Det er i The Royal Docyard on Portsmouth. De massive mure var trukket tilbage i forhold til de udvendige støbejernssøjler, og havde kun en afskæmmende funktion. (4). Omkring midten af det 19. århundrede var præfabrikerede konstruktionssystemer af jern integrerede dele i de fabriksbygninger og togstationer, der opførtes. Jernrammen blev også anvendt indenfor opførsel af væksthuse. Sir Joseph Paxtons kæmpemæssige væksthushavnende Crystal Palace fra 1851 til verdensudstillingen i London var en overbevisende markering af de landvindinger, der var opnået med jern som bygningsmateriale. Crystal Palace bestod af et præfabrikeret standardiseret modulært system, af glas og støbejern. Der blev fremstillet 3300 støbejernssøjler, 2224 støbejernsdragere og 330 km vinduesrammer, samt 300.000 glaspaneler. Crystal Palace dækkede et areal på 71.800 kvadratmeter i grundplanen og havde en maksimal højde på 33 meter. (4).

Det er i tiden omkring opførslen af Crystal palace at en hel række folk spekulerede over betonens anvendelse i byggeriet. Der er stor usikkerhed om hvem og hvornår den armerede beton blev opfundet. Der var patentør, der blev glemt, der var opfindere, der gerne ville præsentere opfindelsen af den armerede beton, men som ikke fik lov af en udstillingskomite, der var nogle, som opfandt armeret beton til at bygge både med, andre opfandt armeret beton til at fremstille blomsterkummer med og der var nogle, der udviklede armeret beton til at bygge søjler, bjælker og broer med. I bogen Science and Building af Henry J. Cowan, (9), konkluderer Cowan at der ikke

Note 1 Fredens mølle på Amager.

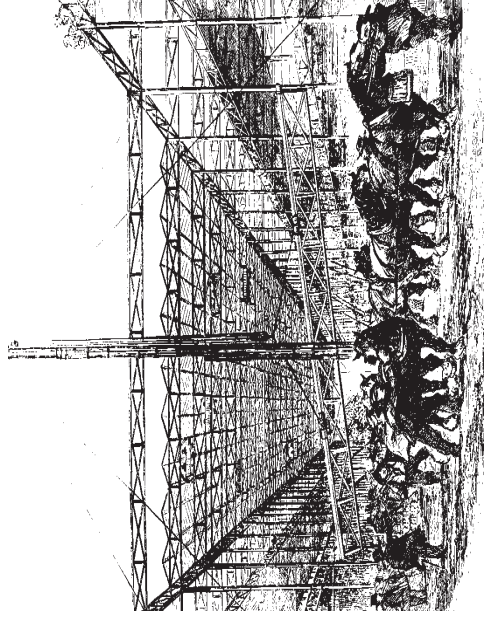
Note 2: Fra små decentrale håndværk blev arbejdet reorganiseret til centrale store fabrikker, som masseproducerede produkter.(4).



er noget simpelt svar på hvem, der opfandt den armerede beton. I det følgende opremses nogle af de opfindelser omkring den armerede beton, der fremkom i midten af det 19. århundrede. Den armerede betons historie indledes med opførslen af William Fairbairns brandsikre gulv som han udviklede omkring 1840 til en 6-etagers fabriksbygning i Manchester. Gulvet bestod af beton, hvori der var indstøbt trækband af smedejern. Betonen var støbt oven på smedejernsplader, der fungerede som permanente støbeforme. (9).

I årene omkring Fairbairns brandsikre gulv opførtes, var Leslie Ransome beskæftiget med undersøgelser omkring forbedring af vedhæftningen af armering i beton. I 1844 patenterede Leslie Ransome en spiralomdrejet firkantet armeringsstang, der kunne sikre en bedre vedhæftning til beton end den glatte armeringsstang kunne. (10).

William Boutland Wilkinson, England, var den første, der patenterede armeret beton. Det gjorde han i 1854. William Boutland Wilkinson var gipsmester. Han havde sit eget firma og

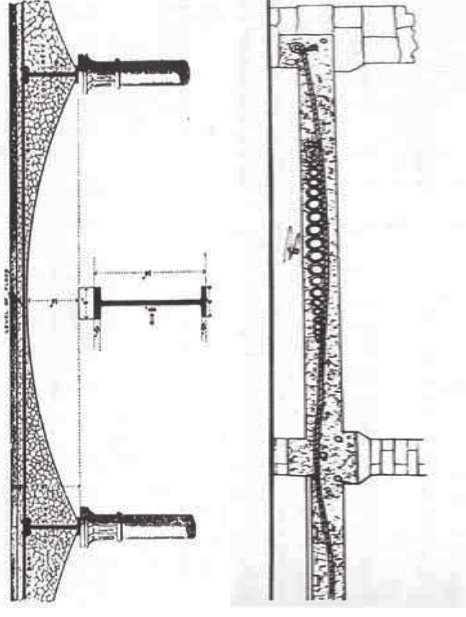


arbejdede som stukatør. Gennem sit stukatørarbejde kom Wilkinson i berøring med Asdins patent. Aspdin havde i sit patent en redegørelse for hvordan beton kunne bruges til stukatørarbejde. I Wilkinsons patent var der udspecificeret at den armerede beton specielt var god til brandsikre konstruktionselementer:

The invention of improvements in the construction of fireproof buildings, warehouses and other buildings or parts of the same, including staircases, pavings, etc. Also with Paris plaster hollow tubular fireproof and soundproof partitions, concrete floors to be reinforced with wire rope and small iron bars, embedded below the central axis of the concrete. (2).

Den beton Wilkinson patenterede bestod af brændt gips, læsset kalk, klippet hør og aske. (10).

Wilkinsons krediteres normalt ikke for at være opfinder af den armerede beton. Hans patent blev glent indtil 1955, hvor en af



hans tidligere byggerier, fra 1865 skulle renoveres. Det gav anledning til at patentet blev fundet frem igen. (9). Francois Coignet er en anden af de uheldige opfindere, der normalt heller ikke krediteres som opfinder af den armerede beton. Coignet var optaget af betonens anvendelse som konstruktionsmateriale. I 1855 patenterede Francois Coignet en gulvkonstruktion, der var fremstillet af armeret beton. Armeringerne i betonen skulle ifølge Coignet modvirke gulvkonstruktionens nedbøjning :

Figur 1: Detalje fra opbygning af Crystal Palace 1851. (4).
 Figur 2: Detalje fra opbygning af Crystal Palace, 1851, monteret af præfabrikerede elementer. (4)
 Figur 3: William Fairbairns brandsikre gulvkonstruktion fra omkring 1840 af armeret beton. (9).
 Figur 4: W.B. Wilkinson's patenterede betongulv. Hovedarmeringen bestod af kabler, der var fikseret ved bjælkeleddene. Drænrør var også inkluderet for at mindske vægten af gulvkonstruktionen. (9).

I 1855 patenterede Francois Coignet en gulvkonstruktion, der var fremstillet af armeret beton. Armeringerne i betonen skulle ifølge Coignet modvirke gulvkonstruktionens nedbøjning :

Eisenstäbe in angemessenem Abstand voneinander, die die vier deckentragenden Begrenzungs-wände vöellig durchdringen und zwar so, dass sie symmetrisch, nach Art eines Schachbrettes einander kreuzen. Dieser Stäbe, verdrillt und mit verdickungen an beiden Enden werden die Decken am Durchhängen hinderne. (2).

Coignet ansøgte om at udstille et hus udført i armeret beton ved verdensudstillingen i Paris i 1855. Men Coignet blev afvist af udstillingskomiteen. (10). Coignet kaldte betonen for Beton Pise'. Pise' er ler på fransk og refererer til en ældgammel byggeskik. Det må formodes at udstillingskomiteen troede at der var tale om et lerhus, der skulle opføres med denne pise-teknik. (2). Francois Coignet opførte i 1855 et bygmesterhus helt i beton, på den nye banestrækning imellem Versailles og Suresness.

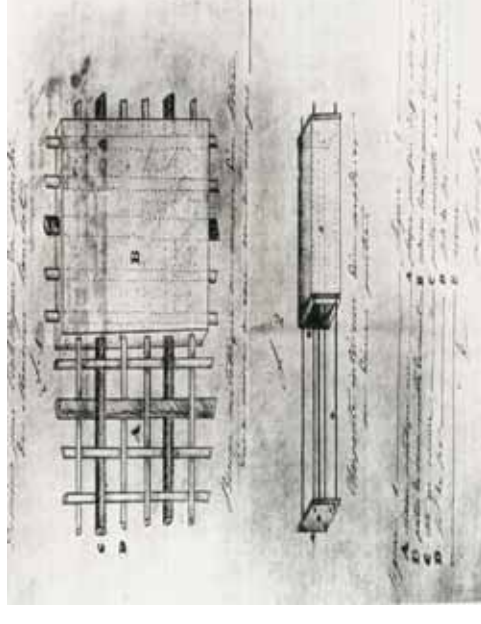
Coignet var optaget af betonens styrke og fandt at styrken havde noget med pakningstæthed af partiklerne og tilsættet at gøre. Coignet var på forkant med nogle af de essentielle problematikker, der dukker op i betonforskningen godt 100 år efter ved udvikling af de første højstyrkebetoner¹. Problemet med en meget tæt beton var dengang at blandingprocessen krævede for mange hestekræfter. Det var med den tætte blanding nødvendigt at anvende 12 heste, hvor der før kun skulle anvendes 1 hest. Coignet ændrede derfor blanding-processen. Han blandede først halvdelen af sandet og bindere, hvorefter den resterende del af sandet kom i blandingen, når den første del var godt sammenblandet. Med denne blandingstype skulle, der kun anvendes 8 heste og der kunne produceres ti gange så meget beton som før. (10).

En af dem der i dag ofte krediteres som værende opfinder af den armerede beton er Joseph Louis Lambot. På den verdensudstilling i Paris i 1855, hvor Francois Coignet ikke fik tilladelse til at deltage, fik derimod Joseph Louis Lambot lov til at præsentere en båd fremstillet af armeret beton. Joseph Lambot havde forinden patenteret den armerede beton. I patentet ses det at Lambot var specielt optaget af betons modstandsdygtighed overfor vand. Han foreslog at den armerede beton kunne bruges i stedet for andre materialer, der ikke var ligeså modstandsdygtige overfor fugt:

Meine erfindung hat in neues Erzeugnis zum Gegenstand, das dazu dient, das Holz im Schiffbau und yberall dort zu ersetzen, wo es feuchtigkeitsgefährdet ist, wie bei Holzfußböden, Wasserbehältern, Planzkybeln etc. Der neue Austaustoff besteht aus einem metallischen Netz aus Drähten oder Stäben , die miteinander verbunden oder zu einem Geflecht beliebiger Art geformt sind. Ich gebe diesem Netz einern form, die im bestmöglichen Masse den Gegenstand angepasst ist , den ich herstellen will und bette es anschliessend in Hydraulischen Cement oder ähnliches wie bitumen, Teer oder ihren Gemischen und vertreiche damit auch etwige Fugen?. (2)

En anden opfinder, der ofte krediteres som værende opfinder af den armerede beton er gartneren Monier.

I 1867 patenterede Monier en blomsterkumme, der var bygget af beton, der var formet omkring et stålnet. (9). I 1873 udvidede Monier sine patenter omkring armeret beton. Hans udvidelser inkluderede beskrivelser af bjælker af armeret beton, der kunne bruges til broer i alle dimensioner. Han foreslog at den armerede beton erstattede andre materialer som træ, sten og jern, da armeret beton ifølge Monier var både økonomisk, solidt og holdbart:



Figur 1: Joseph Louis Lamboths båd som han viste på verdensudstillingen i 1855. Båden er fremstillet af armeret beton. (10).

Figur 2: Illustration af den armerede beton, der indgik i Lamboths patenskrift. (2)

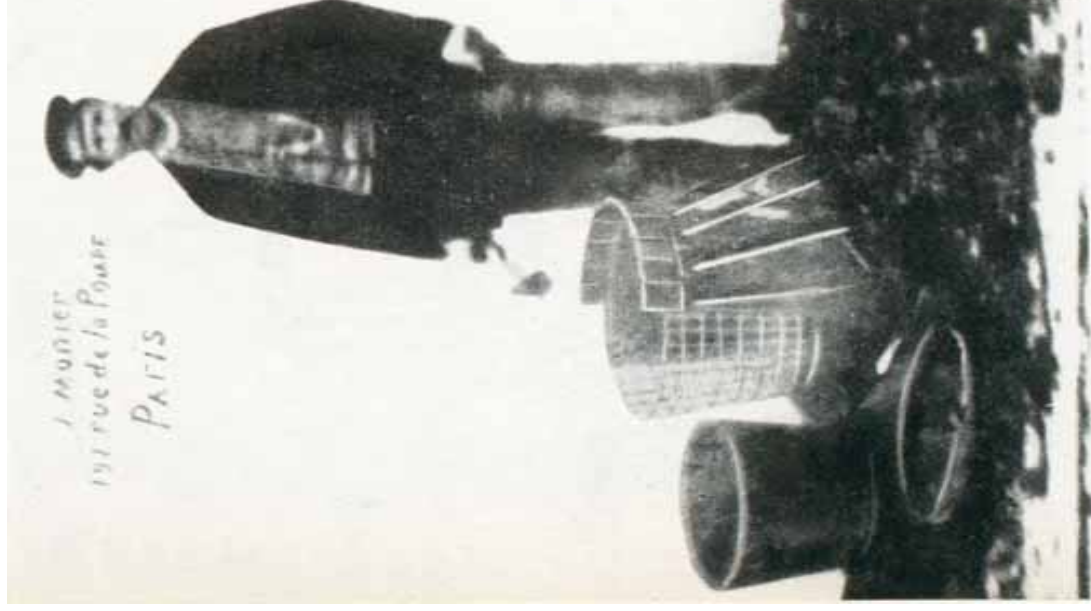
Note 1: Det er noget der endnu i dag oplager mange forskere indenfor betonforskning.

Note 2: Et lille kuriosum fra den tid er Mr. Robins patent fra 1869, hvor Robins anvender tyggummi som bindemiddel mellem jernarmeringen og betonen. (10).

Advokat Thaddeus Hyatt førte den armerede beton til USA. I perioden 1855 til 1877 gennemførte Thaddeus Hyatt en række eksperimenter med armeret beton og udgav i privat cirkulation i 1877 en bog, "An Account of some experiments with Portland Cement". I denne bog beskrev Hyatt beton baseret på Portland-cement kombineret med jern. Han foreslog i sit skrift at den armerede beton kunne anvendes til gulve, tage og gafflader, og skrev desuden at den armerede beton havde en god modstand imod brand. (9). Thaddeus Hyatts arbejde og eksperimenter var specielt interessante fordi han ud fra sine forsøg fandt frem til armeringernes mest fordelagtige placering i konstruktionselementer, der skulle kunne modstå både træk og tryk. Hyatt beskrev i sin bog at betonen kun kunne optage trykbelastninger, men ikke trækbelastninger, hvorfor armeringerne skulle placeres, der hvor betonen blev udsat for træk. Med opfindelsen af den armerede beton gjorde den armerede beton sit indtog i byggeriet som bærende konstruktioner. Men den armerede beton havde nogle problemer. For det første revnede betonen i træksiden, for det andet havde konstruktioner med større spændvidder, for store nedbøjninger. Det armerede til undersøgelse omkring forspændt beton.

Forspændt beton

Med forspændt beton var tanken at betonen skulle spændes så hårdt i tryk, ved at spænde armeringerne, at betonen ikke hverken som følge af sin egen vægt eller som følge af de belastninger, der påførtes, blev udsat for trækbelastninger. Herved var det muligt at undgå revner i træksiden af konstruktionselementerne og minimere nedbøjningerne. I 1880 patenterede amerikaneren Jackson fliser af forspændt beton. Den forspænding, der kunne opnås med armerings-



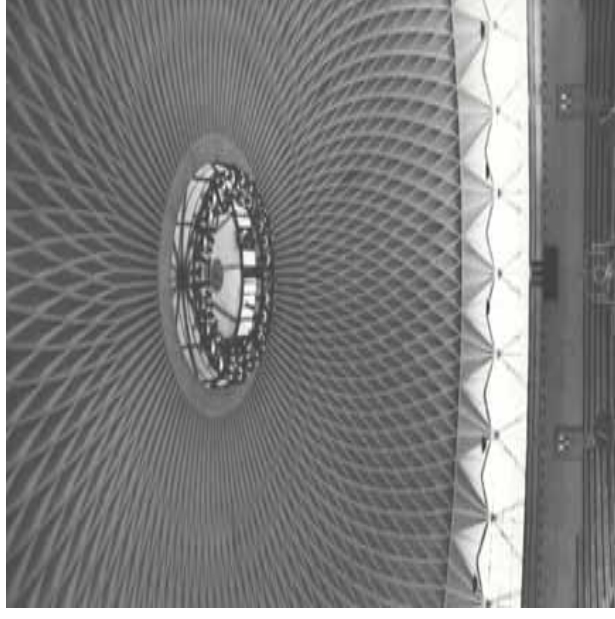
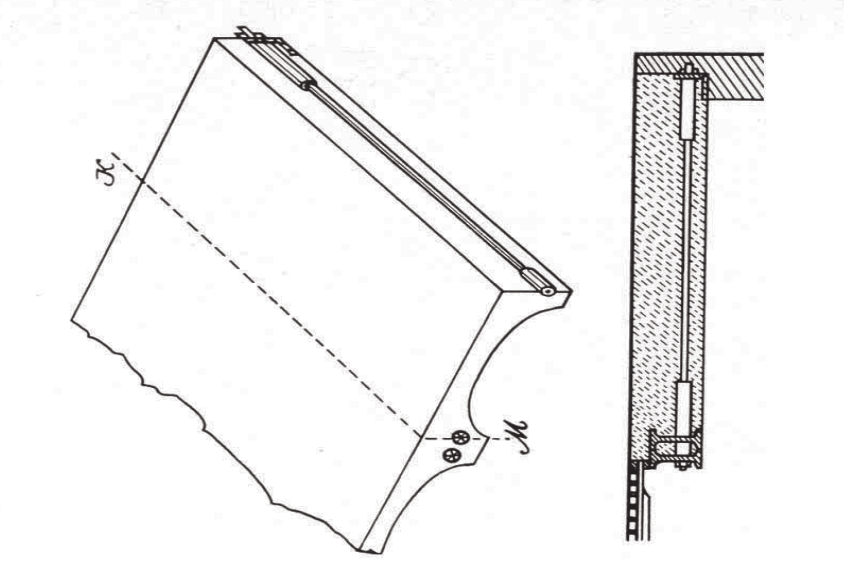
Figur 1. Monier ved siden af en af sine blomsterkummer. (2).

stænger i Jacksons og mange andre patenter efter Jackson omkring armeret beton var ikke stor nok. Armeringerne mistede som følge af tid og belastning den forspænding de havde. De armeringsstål, der anvendtes var ikke stærke nok og betonkvaliteten for ringe til at der kunne opnås den ønskede gode vedhæftning imellem armering og beton. Omkring 1900-1906 patenterede tyskeren Koenen, svenskeren Lund og amerikaneren Steiner forspændt beton, hvor armeringerne blev fastholdt ved at der for enden af betonkonstruktionerne var ankerplader. Med denne teknik var det muligt at opnå en forspænding af betonen, der var større end tidligere forspændte betoner, men det var stadig ikke nok. Der var andre patenter i 1907 af Sacrez og i 1915 af Grisenberry, i 1917 af Wilson, men alle havde de det samme problem forspændingen i betonen forsvandt med belastning og tid. Det var først med udviklingen af højstyrkestål at det var muligt at realisere de tanker og teorier, der lå bag den forspændte beton. Med højstyrkestål kunne der opnås tilstrækkelig forspænding. I 1921 patenterede Karl Wettstein forspændt beton, hvor han brugte klavertråd af stål som armering. De klavertråde han benyttede kunne optage langt større trækkræfter end det var muligt med de tidligere armeringsstænger. Karl Wettstein var opmærksom på at betonens kvalitet havde en meget stor betydning for den forspændte beton. Han forbedrede derfor i sit patent betonen ved at foreslå en anden sammensætning. Karl Wettstein indledte i årene 1927-1931 produktion af forspændte præfabrikerede betonelementer, som mæster og bjælker. Den helt store gennemslagskraft fik den forspændte beton dog først ved den franske ingeniør Eugene Freyssinet arbejde med den forspændte beton. Eugene Freyssinet indgav i 1928 et patent på forspændt beton, der ikke blev godkendt. (2). Hvorfor vides ikke. Det kan være fordi det ikke havde den nyhedsværdi det skulle have.

Mange krediterer i dag Freyssinet som opfinder af den forspændte beton. (2). Eugene Freyssinet var den første, der dannede det videnskabelige grundlag for den forspændte betons og han var nok den første, der forstod den forspændte betons konstruktive rækkevidde. Eugene Freyssinet fik stor betydning for den forspændte betons udbredelse. Freyssinet udviklede og patenterede i 1931 forspændte betonrør, der kunne optage store indre tryk. Denne opfindelse blev i 1936 solgt til det tyske firma Wayas & Freytag AG, der på basis af det kendskab Freyssinet havde videregivet omkring forspændt beton, videreudviklede teknikken til fremstilling af en lang række konstruktioner af forspændt beton. Forspændt beton er i dag en velkendt og anvendt teknik indenfor præfabrikerede betonelementer.

Ferro-cement

I årene omkring 1940 skete der en ny udvikling omkring den armerede beton, der fik stor betydning for opførelse af kurvede og foldede membraner af armeret beton. Det var Pier Luigi Nervis udvikling og patentering af ferro-cement i 1943. Ferro-cement var designet til tynde plader af armeret beton. Armeringen bestod af en lang række stålitternet, der placeredes ovenpå hinanden. I det midterste lag af stålitternetene var der armeringsstænger. Cementbinder udstøbtes ned imellem stålitternetene og dækkede disse. (12). Et eksempel på Nervis anvendelse af ferro-cement kan ses i sportsanlægget Palazzetto dello Sport, Rom 1960. (13). (11). Nervi er udover opfindelsen af ferrocementen også kendt for sine præfabrikationsteknikker, samt for en lang række byggerier, der illustrerede Pier Luigi Nervis gode forståelse for den armerede betons mekaniske opførelse og for konstruktionernes statiske virkemåder.



Figur 1. Jackson's Patent fra 1886, for forspændt beton. (2).

Figur 2. Belætningsprøve af Wettsteins plader af forspændt beton. (2).

Figur 3. Pier Luigi Nervis loftkonstruktion i Palazzetto dello sport i Rom fra 1960. (11).